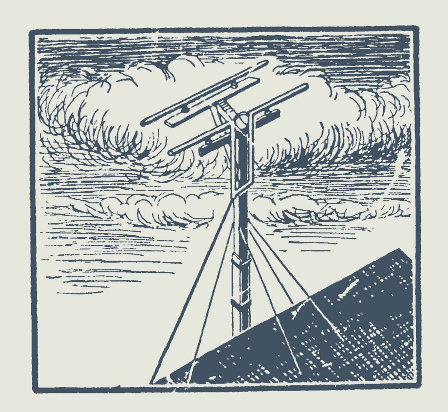


Д. П. ЛИНДЕ

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА



Госэнергоиздат

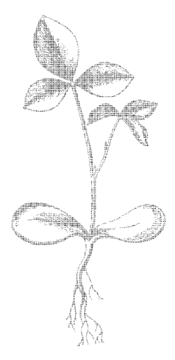
МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 194

Д. П. ЛИНДЕ

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА



Scan AAW



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1953 ЛЕНИНГРАД

В книге дается популярное изложение основ антенной техники и приводится описание современных антенно-фидерных устройств, применяемых в радиолюбительской практике.

Книга рассчитана на радиолюбителей и радиоспециалистов-практиков.

Редактор *К. А. Шульгин* Технический редактор *К. П. Воронин*

Сдано в набор 15/X — 1953 г. Подписано к печати 4/XII — 1953 г
Т — 08300. Бумага $82 \times 108^{1}/_{32}$ = 3 бум. — 9 84 печ. л.+1 вклейка
(11 уч.-изд. л.) Тираж 15 000 экз. Цена 4 р. 40 к. Заказ 311

Типография Госэнергоиздата Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкое развитие радиолюбительского движения в нашей стране ставит вопрос о создании популярных книг по основным разделам радиотехники, доступных массовому читателю.

Если начинающий радиолюбитель интересуется в основном справочным материалом по существующим конструкциям, то радиолюбителя, обладающего опытом самостоятельной практической работы, это удовлетворить уже никак не может. Радиолюбитель, вступивший на путь самостоятельного конструирования, нуждается прежде всего в знании известного минимума общих теоретических положений по тем или иным разделам радиотехники.

Данная книга представляет собой попытку более или менее полного изложения вопросов, интересующих как ту, так и другую группу радиолюбителей.

В популярной форме в ней излагаются основы антенной техники; одновременно приводятся практические сведения об антенно-фидерных устройствах, находящих применение в радиолюбительской практике.

При изложении основных положений автор стремился избегать упрощенчества или приведения бездоказательных утверждений. Как то, так и другое, оставляя у читателя неясность в основных вопросах, не дает возможности по-настоящему правильно и глубоко овладеть всем предметом в целом.

Основное внимание в книге уделяется выработке правильного понимания физической сущности явлений в антенно-фидерных устройствах.

Книга рассчитана на читателя, обладающего знанием основных законов электричества в объеме средней школы и умеющего владеть несколькими основными тригонометрическими формулами. Из общих радиотехнических знаний чи-

тателю необходимо иметь понятие о реактивных сопротивлениях и явлениях резонанса токов и напряжений.

Книга содержит две части. Первая часть посвящена изложению общих вопросов антенной техники и является как бы теоретическим введением ко второй части. Здесь же выводятся соотношения, необходимые при проведении практических расчетов. Эта часть может быть использована для самообразования широким кругом радиолюбителей и радиотехников.

Во второй части приводится описание антенно-фидерных устройств промежуточных, коротких и ультракоротких волн, применяемых в радиолюбительской практике. Даются сведения по их параметрам, монтажу, настройке и регулировке.

Автор

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
Введение 7

Часть первая

Глава первая. **Длинные линии** 13
1. Что такое длинная линия. Как распространяется электромагнитная волна вдоль проводов 13
2. Линия конечной длины без потерь, разомкнутая на конце 20
3. Явления в линии, замкнутой на конце 28
4. Линия, замкнутая на реактивную нагрузку 30
5. Линия, нагруженная на произвольную нагрузку 31
6. Линия, нагруженная на активное сопротивление 36
7. Линия с потерями энергии 38
8. Практические линии 41
9. Основные измерения в фидерных линиях 45
10. Специальные случаи применения длинных линий 47

Глава вторая. **Излучение электромагнитной энергии** . . . 54
11. Основные пути создания излучающих устройств 54
12. Симметричный вибратор (диполь) 57
13. Влияние земли на излучение антенн 74
14. Несимметричный заземленный вибратор 77
15. Резонансные частоты антенн. Гармониковые антенны . . . 79
16. Синфазные и противофазные антенные системы. Рефлекторы и директоры 83
17. Излучение антенн над поверхностью хорошо и плохо проводящей земли 92
18. Сложные вибраторы 98
19. Рамочная антенна 101

Часть вторая

Глава третья. **Антенны радиовещательного и промежуточного диапазонов волн** 103
20. Особенности распространения электромагнитных волн радиовещательного диапазона 103
21. Антенны радиовещательного диапазона 105
22. Особенности распространения промежуточных волн 108
23. Любительские антенны для промежуточных волн 109
24. Устройство заземлений и противовесов 115

Глава четвертая. **Антенны коротких волн** . . . .
25. Особенности распространения коротких волн . . . .
26. Слабонаправленные антенные системы . . . .
27. Антенны для работы в нескольких диапазонах . . . . . .
28. Направленные антенны . . . .
29. Антенны бегущей волны . . . .
30. Компактные направленные антенны . . . .
31. Антенны с изменяемыми диаграммами направленности . . .

Глава пятая. **Антенны ультракоротких волн** . . . .
32. Особенности распространения ультракоротких волн . . .
33. Особенности антенн метровых волн . . . .
34. Слабонаправленные ультракоротковолновые антенны . . .
35. Направленные ультракоротковолновые антенны . . . . . .

Глава шестая. **Связь генератора с антенной** . . . .
36. Схемы связи при питании антенны бегущей волной . . .
37. Схемы связи при питании антенны фидером со стоячими волнами . . . .
38. Симметрирующие схемы . . . .
39. Эквивалент антенны . . . .

ВВЕДЕНИЕ

К концу прошлого и началу настоящего столетия физики установили, что свет, тепловые, ультрафиолетовые, рентгеновские лучи и радиоактивное излучение имеют одну природу, — все они представляют собой электромагнитные волны. Разнообразие их физических свойств определяется только различием в длинах волн.

Из всех электромагнитных волн для целей связи долгое время использовались только световые лучи. В конце XIX столетия были открыты наиболее длинные электромагнитные волны, которые получили название радиоволн. Честь первого практического применения их для связи принадлежит великому русскому физику и изобретателю А. С. Попову.

Что же мы называем электромагнитными волнами? Известно, что в пространстве, окружающем электрические заряды, обнаруживается действие электрических сил. На пробный заряд, внесенный в это пространство, действует сила притяжения или отталкивания, заставляющая его перемещаться в том или ином направлении.

Пространство в котором обнаруживается действие электрических сил представляет собой особую материальную среду, называемую *электрическим полем.*

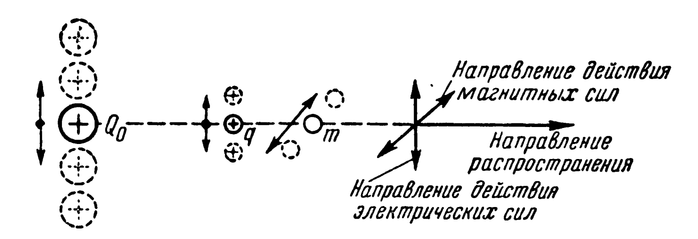
То же самое происходит и в пространстве, окружающем магнит. Существование магнитного поля можно обнаружить по силовому воздействию на пробные магнитные тела.

Пространство, в котором обнаруживается одновременное действие электрических и магнитных сил, называется *электромагнитным полем.*

Очевидно, что *сила* или, как чаще называют, *напряженность поля* в данной точке пространства зависит от величины заряда, образовавшего поле, и от расстояния до него. Поэтому всякое изменение величины или расположения заряда приводит к изменению напряженности поля в данной

точке. Однако изменения электрического поля во всем пространстве происходят не мгновенно, а распространяются с некоторой конечной скоростью c во все стороны от точки, где произошло первоначальное возмущение. В вакууме и в воздухе эта скорость близка к 300 000 *км/сек*. В других средах она меньше.

Если в поле некоторого заряда Q_0 поместить пробные электрические заряды и рядом с ними пробные магниты (фиг. 1), то мы увидим, что при изменении величины или при перемещении основного заряда начнут перемещаться не только электрические заряды, но и пробные магниты. По



Фиг. 1. Направление движения электрических зарядов q и пробных магнитов m при перемещении заряда Q_0.

характеру перемещения последних нетрудно убедиться, что оно произошло под действием магнитных сил, направление которых перпендикулярно направлению электрических сил.

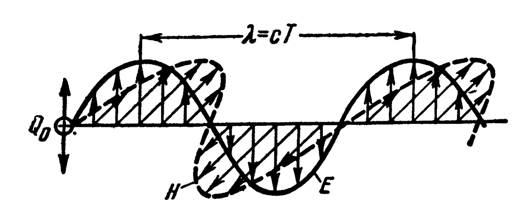
Отсюда можно сделать вывод, что любое изменение величины или положения электрических зарядов вызывает одновременное изменение электрического и магнитного поля, которое распространяется с очень большой, но конечной скоростью во все стороны от данной точки. Действие возникающих при этом электрических и магнитных сил происходит в двух взаимно перпендикулярных направлениях, перпендикулярных направлению распространения данного возмущения.

Распространение изменяющегося поля связано с переносом энергии в пространстве. Эта энергия получила название *энергии электромагнитного поля* или просто *электромагнитной энергии.*

Если в некоторой точке пространства периодически изменяется электрический или магнитный заряд, то от него во все стороны распространяются периодические изменения электрического и магнитного поля, которые и принято называть *электромагнитными волнами.* Поскольку напряжен-

ность поля электромагнитной волны изменяется периодически (т. е. через определенный промежуток времени T, называемый *периодом*, поле приобретает свое первоначальное значение), то в точках пространства, расположенных друг от друга на расстоянии, которое волна пройдет за время T, — поля будут одинаковы.

На фиг. 2 в некотором масштабе показано распределение напряженности электрического поля E и магнитного поля H, создаваемых электромагнитной волной в пространстве в некоторый момент времени. Расстояние между двумя бли-



Фиг. 2. Распределение магнитного *H* и электрического *E* полей электромагнитной волны в пространстве.

жайшими точками пространства, в которых напряженность электрического или магнитного поля одинакова, называется *длиной электромагнитной волны* и обозначается буквой λ:

$$\lambda = cT.$$

Теоретическая физика установила, что электромагнитные волны излучаются электронами, двигающимися с ускорением. Получить электромагнитные волны можно, заставив электроны перемещаться с постоянной скоростью по круговым орбитам. Испытывая при этом центростремительное ускорение, они будут излучать электромагнитную энергию в окружающее пространство. Однако техническое осуществление этой идеи весьма затруднительно, и только сейчас мы приближаемся к решению данной задачи.

Второй путь заключается в использовании прямолинейно движущихся электронов. Естественно, что ускорять электроны непрерывно в одном направлении невозможно. Через некоторое время необходимо вернуть электроны в исходное положение, сообщив им ускорение противоположного знака. Затем процесс повторяется снова и т. д.

Осуществляется это весьма просто. К линейному проводнику прикладывается переменная э. д. с., под действием ко-

торой свободные электроны, содержащиеся в металле проводника, приходят в периодическое колебательное движение.

Такой линейный проводник, питающийся переменной э. д. с., является простейшей *передающей антенной* — устройством, преобразующим энергию источника переменной э. д. с. в энергию электромагнитных волн.

В приемном пункте необходимо решить обратную задачу, т. е. преобразовать энергию электромагнитной волны в энергию переменных токов. Для этого достаточно поместить в переменное электромагнитное поле линейный проводник. Свободные электроны проводника под действием электромагнитного поля придут в колебательное движение и создадут в нем переменный ток. В этом случае линейный проводник будет являться *приемной антенной*, преобразующей энергию электромагнитной волны в энергию переменного тока.

Антенну к приемнику или передатчику присоединяют с помощью проводов, называемых *фидерными линиями*. Таким образом, всякая приемная и передающая радиостанция должна иметь *антенно-фидерное устройство*.

Антенное устройство является резонансной системой, обладающей собственной резонансной частотой, или, как чаще говорят, собственной длиной волны. При работе антенны на резонансной частоте излучающие свойства антенны оказываются наилучшими. Как будет видно из дальнейшего, собственная длина волны антенны соизмерима с ее геометрическими размерами. Это затрудняет использование очень длинных радиоволн.

Радиотелефонная связь осуществляется с помощью электромагнитных волн, созданных колебаниями высоких частот, промодулированными тем или иным способом звуковыми частотами. Модулированные колебания представляют собой целый спектр высокочастотных колебаний. Поэтому, чтобы не вносить искажений в передачу, антенна должна одинаково преобразовывать в электромагнитные волны все частоты, входящие в состав этого спектра.

О том, какое воздействие оказывают на антенну колебания различных частот, рассказывает частотная или резонансная характеристика антенны.

Практически далеко не всегда имеется возможность работать на собственной волне антенны. Кроме того, очень много передатчиков работает в широком диапазоне частот, используя только одну антенну. Знание резонансной характеристики позволит сказать, как будет вести себя антенна

при переходе с одной рабочей волны на другую и какие меры необходимо принять, чтобы использовать ее с максимальной эффективностью.

Как и у всякого преобразователя энергии, одним из основных параметров, характеризующих работу антенно-фидерного устройства, является к. п. д. Он позволяет судить о том, какая доля подводимой мощности электрических колебаний преобразуется в мощность электромагнитных волн.

Антенна излучает энергию неодинаково в различных направлениях или, иначе говоря, обладает известными направленными свойствами. Направленные свойства антенн принято характеризовать *диаграммами направленности*, показывающими в относительных единицах, с какой интенсивностью антенна излучает энергию в различных направлениях.

Эффективность работы всей антенно-фидерной системы, а часто и диаграмма направленности антенны в значительной степени определяются свойствами фидерной линии и способом соединения ее с антенной. Условия полной передачи энергии фидерной линией от генератора к антенне называются условиями согласования. Выполнение их часто требует устройства специальных согласующих приспособлений.

Наконец, важное значение имеет рациональный выбор схемы связи антенно-фидерной системы с генератором и способ настройки антенной цепи.

Таким образом, при знакомстве с антенно-фидерными устройствами нас в первую очередь будут интересовать: собственная длина волны антенны, ее резонансная характеристика, направленные свойства, условия согласования антенны с фидером, к. п. д. антенно-фидерного устройства, выбор способа связи с генератором и схемы настройки выхода передатчика. Конечно, этими данными не исчерпывается описание антенно-фидерных устройств. В дальнейшем мы познакомимся с рядом других показателей, играющих важную роль в оценке системы. Наиболее важными из них являются экономические, конструктивные и эксплуатационные соображения.

В своей первой радиостанции А. С. Попов в 1895 г. впервые в мире применил несимметричную антенну. Намного опередив свое время, он предсказал возможность создания направленных антенных систем. Несимметричная антенна Попова сыграла огромную роль в развитии длинноволновой техники и в настоящее время наряду с симметричной

антенной она является одним из основных излучающих устройств.

Трудами выдающихся русских и советских ученых: Л. И. Мандельштама, Н. Д. Папалекси, Д. А. Рожанского, М. В. Шулейкина и др. были созданы основы теории и методы расчета антенн длинных и средних волн.

В 20-х годах, когда началось освоение диапазона коротких волн, большая работа по созданию коротковолновых антенн была проведена в Нижегородской радиолаборатории им. В. И. Ленина. В 1925 г. работники этой радиолаборатории М. А. Бонч-Бруевич и В. В. Татаринов создали первые направленные антенны, состоящие из системы полуволновых симметричных излучателей. Следует отметить, что за границей подобные антенны появились значительно позже.

В. В. Татаринов предложил также метод настройки вибраторов с помощью реактивных шлейфов, являющийся и до настоящего времени одним из основных методов настройки антенн.

В последующие годы советскими инженерами был разработан целый ряд антенн, широко используемых в настоящее время как в профессиональной, так и в любительской практике: диполь С. И. Надененко, уголковая антенна А. А. Пистолькорса, шлейф-антенна А. А. Пистолькорса и др.

Огромный вклад в теорию антенн внесли советские ученые: Д. А. Рожанский, В. А. Фок, В. В. Татаринов, М. А Леонтович, А. А. Пистолькорс и др.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ДЛИННЫЕ ЛИНИИ

1. Что такое длинная линия. Как распространяется электромагнитная волна вдоль проводов

Знакомство с антенно-фидерными устройствами начнем с изучения свойств фидерных линий.

Применяемые в радиотехнике фидерные линии с электротехнической точки зрения являются длинными линиями.

Длинными линиями принято называть электрические линии, длина которых соизмерима с длиной распространяющихся вдоль них волн.

Название это не должно вводить читателя в заблуждение в том смысле, что это должны быть обязательно очень длинные линии. Поскольку в настоящее время часто используются волны, длина которых измеряется сантиметрами, то и длинные линии могут иметь размеры того же порядка.

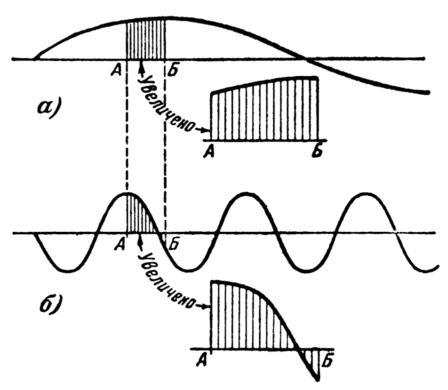
Наоборот, в электротехнике сильных токов, несмотря на то, что линии часто имеют протяженность в сотни километров, их нельзя относить к «длинным» с электротехнической точки зрения.

В чем же заключается отличие явлений, происходящих в длинных линиях, от явлений в обычных электрически «коротких» линиях?

Если в линии укладывается небольшая доля волны, то с некоторым приближением можно считать, что в каждый данный момент времени напряжение и ток во всех точках линии одинаковы. Последнее позволяет судить о явлениях, происходящих в линии, по тем процессам, которые происходят в любой ее точке. В этом можно убедиться при рассмо-

трении фиг. 3,*а*, на которой изображено распределение тока (или напряжения) в участке линии *АБ* при большой длине волны.

Если увеличить частоту электрических колебаний, то длина волны уменьшится, и на участке линии *АБ* уложится уже значительная доля волны (фиг. 3,*б*), а может быть и несколько волн. При этом в различных точках линии в один и тот же момент ток (или напряжение) может иметь не только различную величину, но и различное направление. Это значительно усложняет рассмотрение подобных систем. Становится невозможным говорить о процессах во всей линии в целом, не изучив процессы, происходящие в ее отдельных точках.



Фиг. 3. Распределение тока (напряжения) вдоль линии.

а — участок линии значительно короче длины волны; *б* — участок линий соизмерим с длиной волны.

Явления в длинных линиях подчас кажутся парадоксальными с точки зрения обычной электротехники постоянного тока или токов низких частот. Например, длинная короткозамкнутая линия при некоторых условиях может представлять собой бесконечно большое, а разомкнутая, — бесконечно малое сопротивление и т. д.

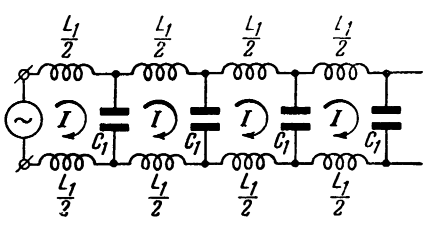
Рассмотрим простейшие длинные линии, состоящие из двух одинаковых параллельных проводов.

Каждая единица длины провода линии обладает некоторой индуктивностью. Кроме того, противоположные участки проводов, образуя как бы обкладки конденсатора, обладают некоторой емкостью. Индуктивность L_1 и емкость C_1, приходящиеся на единицу длины линии, называются ***погонными индуктивностями и емкостями.*** Разбив условно всю линию на элементарные единичные участки, можно изобразить эквивалентную электрическую схему длинной линии в виде, представленном на фиг. 4.

Если к одному из концов линии, который мы будем в дальнейшем называть входом, присоединить генератор переменной э. д. с., то в первой ее ячейке (фиг. 4) возникнет

переменный ток. Проходя через эквивалентный элементарный конденсатор C_1, этот ток создаст на нем некоторую разность потенциалов. Так как конденсатор C_1 входит в состав следующей ячейки, возникшая на нем переменная разность потенциалов вызовет появление переменного тока в следующей ячейке и т. д.

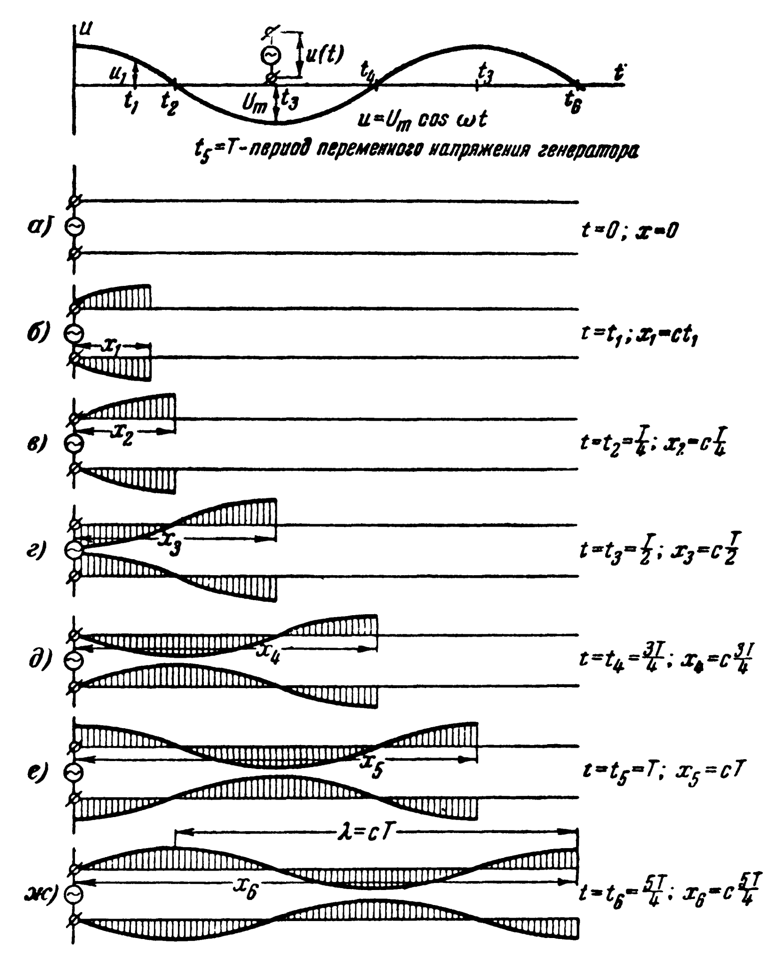
Несколько более наглядно можно объяснить процесс передачи электромагнитной энергии вдоль проводов следующим образом. Подключим на короткий отрезок времени к линии источник постоянной э. д. с. На одном зажиме источника э. д. с. существует избыток, а на другом недостаток электронов. Поэтому под действием сил электростатического притяжения и отталкивания с одного зажима электроны начнут стекать в провод линии, а свободные электроны из второго провода начнут переходить на второй зажим генератора в количествах, необходимых для восстановления электрического равновесия. В результате на начальных участках проводов возникает такой же избыток и недостаток электронов, и между ними появится та же разность потенциалов, которая была на зажимах генератора. К этим участкам потекут заряды из прилежащих участков проводов и т. д. Так, от участка к участку вдоль проводов линии независимо от того, замкнута она или разомкнута, будет передаваться напряжение от генератора. Процесс этот связан с движением электрических зарядов, т. е. с появлением тока в проводах. Появившийся ток образует вокруг себя магнитное поле. Следовательно, вдоль проводов будет распространяться некоторое постоянное электрическое и магнитное поле.



Фиг. 4. Эквивалентная схема длинной линии.

Аналогичные явления произойдут в линии при подключении на вход генератора переменной э. д. с. В этом случае вдоль линии будет распространяться переменная э. д. с., а в проводах потечет переменный ток. Переменный ток создает вокруг себя переменное магнитное поле, и вдоль линии начнут распространяться периодические возмущения электрического и магнитного поля — электромагнитные волны Скорость распространения электромагнитных волн вдоль воздушных линий близка к скорости света (300 000 *км/сек*).

Предположим, что в момент подключения к линии ген ратора переменной э. д. с. напряжение на его зажимах ма симально (фиг. 5,*а*). Это напряжение с момента времен



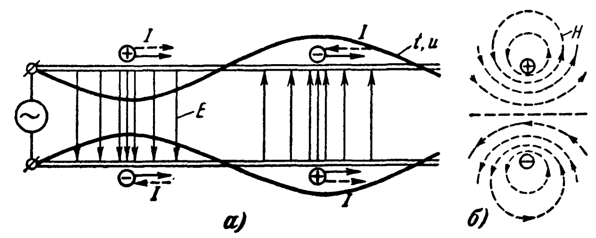
Фиг. 5. Распространение волны напряжения вдоль линии.

$t = 0$ начнет со скоростью света распространяться вдоль линии. К моменту времени $t = t_1$ оно дойдет до точки, отстоящей от входа линии на расстоянии x_1 (фиг. 5,*б*). За это время напряжение на зажимах генератора уменьшится до значения U_1. Промежуточные напряжения успеют пройти

вдоль линии меньшие расстояния и окажутся в точках, расположенных между x_1 и входом линии.

Через промежуток времени $t_2 = \frac{T}{4}$ (T — период изменения напряжения на генераторе) первоначальное напряжение достигнет точки, удаленной от входа линии на расстояние $x_2 = c\frac{T}{4}$, а напряжение на зажимах генератора окажется равным нулю (фиг. 5,*в*).

Еще через четверть периода напряжение на зажимах генератора станет снова максимальным, но противоположным по знаку. Первоначальное напряжение к этому вре-



Фиг. 6. Электрическое (*а*) и магнитное (*б*) поля линии.

мени достигнет точки, удаленной от входа линии на расстояние $x_3 = c\frac{T}{2}$; нулевой потенциал окажется в точке x_2, и картина распределения напряжения вдоль линии будет изображаться фиг. 5,*г*.

Аналогичным образом можно проследить процесс для последующих моментов времени $t_4 = \frac{3}{2}T$; $t_5 = T$; $t_6 = \frac{5}{4}T$, представленными на фиг. 5,*д*, *е* и *ж*.

Таким образом, вдоль линии распространяется волна переменного напряжения. Одновременно происходит перемещение зарядов в проводах линии в противоположных направлениях.

Разные по знаку заряды на равноотстоящих от начала линии участках проводов создают между проводами электрическое поле, которое имеет различное направление и величину, как показано на фиг. 6,*а*, и перемещается вдоль линии со скоростью света. Распределение магнитного поля около проводов изображено на фиг. 6,*б*.

Ток, протекающий в проводах, создает вокруг них магнитное поле, величина и направление которого зависят от

величины и направления тока в данном участке провода.

Из сказанного можно сделать вывод, что при подключении генератора переменной э. д. с. к линии в ней начнет распространяться волна переменного тока и напряжения, а в пространстве около проводов возникает переменное электрическое и магнитное поле, также распространяющееся вдоль проводов, т. е. то, что мы называем электромагнитной волной.

Длина этой волны в метрах, измеряемая между точками, имеющими одинаковую фазу, равна:

$$\lambda_м = 3 \cdot 10^8 \cdot T, \quad (1)$$

где T — период колебаний, сек.

Напряжение от генератора приходит в данную точку провода с некоторым запозданием, которое зависит от удаления ее от входа линии. Например, в момент $t = 0$, когда напряжение на генераторе было максимальным, в точке x_2 никакого напряжения еще не было. Оно пришло в точку x_2 через время $t = \frac{T}{4}$, когда на генераторе напряжение уже упало до нуля, и т. д. Иными словами, если напряжение на генераторе изменяется по закону

$$u = U_m \cos \omega t, \quad (2)$$

то в точке, расположенной на расстоянии x от входа линии, оно будет изменяться таким же образом, но с запаздыванием на промежуток времени

$$\Delta t = \frac{x}{c}, \quad (3)$$

за который электромагнитная волна дойдет до данной точки.

Следовательно, напряжение в этой точке будет изменяться по закону

$$u_x = U_m \cos \omega \left(t - \frac{x}{c}\right). \quad (4)$$

Рассмотренный выше процесс характерен распространением электромагнитной волны вдоль линии в одном направлении. При этом происходит перенесение энергии от генератора к ее концу. Такой режим работы линии называется *режимом бегущей волны*. Получить его можно только в том

случае, когда вся энергия электромагнитной волны поглощается на конце линии, благодаря чему становится невозможным возникновение отраженных волн.

Выражение (4) называется уравнением бегущей волны. Оно может быть использовано двояко: зафиксировав какое-нибудь значение времени t, можно найти распределение напряжения, имеющее место в данный момент времени в линии, или, зафиксировав некоторое значение координаты x, можно для данной точки найти зависимость напряжения от времени.

Поскольку в режиме бегущей волны линия поглощает всю энергию, отдаваемую ей генератором, и ничего не возвращает обратно, то она представляет для генератора чисто активную нагрузку. Следовательно, ток и напряжение в линии при режиме бегущей волны должны находиться в фазе.

Каково же сопротивление этой нагрузки? Чтобы найти его значение, надо разделить амплитуду напряжения на амплитуду тока в линии. Найти это отношение можно на основании следующих соображений.

В каждой из ячеек, составляющих эквивалентную схему длинной линии фиг. 4, единичные индуктивности запасают энергию в виде энергии магнитного поля, равную

$$W_L = \frac{L_1 I_m^2}{2}, \qquad (5)$$

где W_L — энергия, запасаемая в погонной индуктивности линии;

I_m — амплитуда тока в линии.

Одновременно распределенные емкости запасают энергию в виде энергии электрического поля элементарных конденсаторов, которая равна

$$W_C = \frac{C_1 U_m^2}{2}. \qquad (6)$$

Количества энергии, запасаемой индуктивностями и емкостями, должны быть равны, так как иначе линия представляла бы собой некоторую индуктивную или емкостную нагрузку для генератора, т. е.

$$\frac{L_1 I_m^2}{2} = \frac{C_1 U_m^2}{2};$$

откуда непосредственно получаем:

$$\rho = \frac{U_m}{I_m} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}. \qquad (7)$$

Здесь ρ — входное сопротивление линии в режиме бегущей волны, называемое *волновым или характеристическим сопротивлением*. Как было уже ранее показано, оно имеет чисто активный характер.

Необходимо заметить, что входное сопротивление линии в режиме бегущей волны равно ρ в любых ее точках, ибо какие бы точки линии мы ни взяли, справа будет находиться все та же бесконечная линия, входное сопротивление которой равно ее волновому сопротивлению.

Волновое сопротивление линии играет чрезвычайно важную роль в теории и практике антенно-фидерных устройств. Распределенная емкость и индуктивность линии зависят только от диаметра ее проводов и расстояния между ними. Следовательно, и волновое сопротивление целиком определяется конструктивными параметрами линии и не зависит от частоты генератора.

Расчетные формулы для вычисления погонной емкости и индуктивности проводов имеют следующий вид:

$$L_1 = 0{,}921 \lg \frac{2D}{d} \quad \text{и} \quad C_1 = \frac{12{,}1}{\lg \frac{2D}{d}},$$

где D — расстояние между проводами;
d — диаметр проводов.

Подставляя эти выражения в формулу (7), получим:

$$\rho = 276 \lg \frac{2D}{d}. \qquad (8)$$

Величины D и d выбираются из соображений конструктивного удобства, получения малых потерь, механической прочности и т. д. Для обычных двухпроводных воздушных линий величина волнового сопротивления обычно лежит в пределах от 400 до 800 *ом*.

2. Линия конечной длины без потерь, разомкнутая на конце

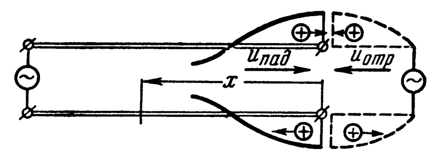
С точки зрения электротехники постоянного тока или техники токов низких частот линия конечной длины, разомкнутая на конце, всегда должна представлять собой бесконечно большое сопротивление для генератора. В технике же высо-

ких частот, где линия становится соизмеримой с длиной волны, результаты получаются совершенно иными.

При рассмотрении явлений в линии конечной длины более удобно вести отсчет расстояний от ее конца (фиг. 7).

При подключении линии к источнику питания, в ней начнет распространяться электромагнитная волна, которую принято называть *падающей.*

Энергия, приносимая этой волной, не может поглотиться на разомкнутом конце, поэтому она полностью отразится и возвратится обратно к генератору. Таким образом, одновременно в линии в противоположных направлениях распространяются две электромагнитные волны — *падающая и отраженная.* В результате сложения этих волн в ней устанавливаются так называемые *стоячие волны.*



Фиг. 7. Обрыв линии эквивалентен подключению синфазного генератора.

Чтобы выяснить, как образуются и что собой представляют стоячие волны, необходимо найти результат сложения падающей и отраженной волны в различных точках линии.

Поскольку все изменения напряжения на входе линии передаются вдоль нее со скоростью света, то, начиная с некоторого момента времени, напряжение на конце, создаваемое падающей волной, будет изменяться по закону

$$u_{x=0} = U_m \cos \omega t. \tag{9}$$

Заряды, подойдя к концу линии, не смогут итти дальше, в результате чего величина тока на ее конце

$$I_{x=0} = 0, \tag{10}$$

т. е. окажется равной нулю, несмотря на наличие напряжения, приносимого падающей волной.

Такие же условия создались бы на конце линии, если бы к нему был подключен генератор переменной э. д. с., амплитуда и фаза которой были такими же, как и у падающей волны (фиг. 7). Действительно, при этом на заряды, находящиеся на конце, действовали бы в противоположных направлениях два одинаковых напряжения. Поэтому никакого тока в точке $x = 0$ не было бы, несмотря на приходящие волны напряжения.

Поскольку все явления, происходящие на конце линии, со скоростью света передаются вдоль нее, то и во всей линии

явления будут происходить так, как будто на ее конце включен генератор, создающий э. д с. по указанному выше правилу. Такой «генератор» создаст в линии волну, бегущую от конца к началу и имеющую на конце такую же амплитуду и фазу, что и падающая волна. Эту волну принято называть *отраженной волной.*

Если падающая волна создает на конце напряжение, определяемое из выражения (9), то напряжение в момент времени t в точке x будет создаваться волной, вышедшей из генератора позже на время

$$\Delta t = \frac{x}{c}. \tag{11}$$

Значит в точке x падающая волна создает напряжение

$$u_{x\,пад} = U_m \cos\omega\left(t + \frac{x}{c}\right). \tag{12}$$

Одновременно в ту же точку приходит волна, отраженная от конца ранее момента t на время, потребное для прохождения пути x. Она создает в данной точке напряжение

$$u_{x\,отр} = U_m \cos\omega\left(t - \frac{x}{c}\right). \tag{13}$$

Результирующее напряжение в точке, находящейся на расстоянии x от конца линии, равно сумме напряжений падающей и отраженной волны:

$$u_x = U_m\left[\cos\omega\left(t + \frac{x}{c}\right) + \cos\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right]. \tag{14}$$

Преобразуем это выражение, пользуясь известной тригонометрической формулой преобразования суммы косинусов двух углов в произведение:

$$\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos\frac{\alpha+\beta}{2}\cdot\cos\frac{\alpha-\beta}{2}. \tag{15}$$

Получим:

$$u_x = 2U_m\cos\frac{\omega}{c}x\cdot\cos\omega t. \tag{16}$$

Поскольку круговая частота связана с периодом колебаний соотношением

$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

а период колебаний можно выразить через

$$T=\frac{\lambda}{c},$$

то аргумент в первом сомножителе формулы (16) преобразуется следующим образом:

$$\frac{\omega}{c}=\frac{2\pi}{Tc}=\frac{2\pi}{\lambda}.$$

И окончательно закон изменения напряжения в точке x получится в виде

$$u_x=2U_m\cos\frac{2\pi}{\lambda}x\cdot\cos\omega t. \qquad (17)$$

Это выражение называется уравнением стоячей волны напряжения. Для того чтобы разобраться в особенностях режима стоячих волн, проанализируем полученное уравнение.

Множитель, не зависящий от времени, стоящий перед членом $\cos\omega t$, выражает собой амплитуду колебательного процесса. В данном случае амплитуда напряжения меняется от точки к точке. На конце линии, где $x=0$,

$$U_{x=0}=2U_m,$$

т. е. амплитуда напряжения будет вдвое больше напряжения, создаваемого генератором.

На расстоянии $x=0{,}25\lambda$ от конца линии, амплитуда напряжения

$$U_{x=0{,}25\lambda}=0,$$

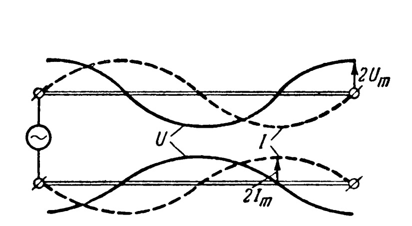
т. е. в любой момент времени в этой точке напряжение будет равно нулю.

В точке, удаленной от конца на расстояние $x=0{,}5\ \lambda$, амплитуда колебаний будет опять равна $2U_m$, и через каждые полволны картина будет повторяться.

На фиг. 8 сплошной линией изображен график распределения амплитуд напряжения в различных точках линии.

Здесь хорошо видно первое существенное отличие режима стоячей волны от режима бегущей волны. Если в режиме бегущей волны амплитуда напряжения во всех точках линии одинакова, то в режиме стоячих волн она изменяется от точки к точке от удвоенного значения до нуля. Изменения эти следуют периодически через полволны, считая от разомкнутого конца.

Необходимо обратить внимание на то, что график, изображенный на фиг. 8, представляет собой не значение напряжения в отдельных точках линии в данный момент, а характеризует только амплитуду происходящих в них колебаний. Мгновенные же значения напряжения могут быть самыми различными в пределах от нуля и до максимального значения. На фиг. 9 приведены графики распределения мгновенных значений напряжения вдоль одного провода линии в несколько последовательных моментов времени.



Фиг. 8. Распределение амплитуд тока и напряжения вдоль проводов разомкнутой линии.

Фиг. 9. Распределение напряжения в отдельные моменты времени вдоль разомкнутой линии (стоячие волны).

Аналогичным образом найдем распределение тока в проводах разомкнутой линии.

Поскольку падающая и отраженная волны являются бегущими волнами, то токи и напряжения, переносимые ими, будут находиться в фазе. Поэтому на основании выражений (12) и (13) можно написать:

$$i_{x\,пад} = I_m \cos \omega \left(t + \frac{x}{c}\right) \text{ и } i_{x\,отр} = I_m \cos \omega \left(t - \frac{x}{c}\right). \quad (18)$$

Рассмотрение явлений на конце линии показало, что данный случай эквивалентен включению на конце линии синфазного генератора, создающего в линии отраженную волну тока, которая имеет направление, противоположное падающей волне. Поэтому

$$i_x = i_{x\,пад} - i_{x\,отр} \quad (19)$$

и после действий, аналогичных рассмотренным ранее, получаем:

$$i_x = -2I_m \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \cdot \sin \omega t. \quad (20)$$

Из этого выражения видно, что амплитуда тока также изменяется от точки к точке, но характер этого изменения иной, чем у напряжения. Так, на конце линии ($x=0$) ток всегда равен нулю, на расстоянии $x=0{,}25\ \lambda$ от конца амплитуда тока равна удвоенному значению тока генератора и т. д. Распределение амплитуд тока вдоль линии показано пунктиром на фиг. 8. Легко видеть, что оно отличается от распределения амплитуд напряжения смещением на четверть волны.

Если в режиме бегущей волны входное сопротивление линий в любой ее точке одинаково и активно по своему характеру, то в режиме стоячих волн оно может иметь самую различную величину, а по характеру — реактивно. На самом деле, уже рассмотрение фиг. 8 приводит к выводу, что входное сопротивление линии, равное отношению амплитуды напряжения к амплитуде тока, в различных точках линии будет неодинаковым. Так, например, на расстоянии $0{,}25\lambda$ от конца линии амплитуда тока равна $2I_m$, а амплитуда напряжения — нулю. Следовательно, входное сопротивление здесь равно нулю. Это и понятно: если по какому-то элементу течет ток, и при этом на нем не создается разности потенциалов, то это означает, что его сопротивление равно нулю.

На расстоянии $0{,}5\lambda$ от конца линии, наоборот, величина тока равна нулю, а напряжение равно $2U_m$ и, следовательно, входное сопротивление равно бесконечности. Действительно, если к какому-то элементу подводится напряжение и оно не создает в нем тока, то это означает, что он обладает бесконечно большим сопротивлением.

Эти значения входного сопротивления повторяются периодически через полволны. В промежуточных точках входное сопротивление может принимать любые промежуточные значения от нуля до бесконечности.

Поскольку разомкнутая линия без потерь не поглощает энергии, а только в течение некоторой части периода запасает ее, а затем возвращает обратно источнику, то она представляет для генератора чисто реактивную нагрузку.

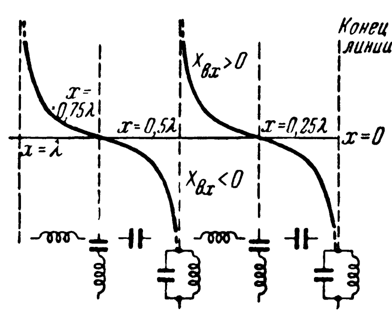
Взяв выражение для амплитуды напряжения из (17) и выражение для амплитуды тока из (20) и разделив одно на другое, получим значение входного сопротивления разомкнутой линии:

$$X_{вх}=-\frac{U_m}{I_m}\operatorname{ctg}\frac{2\pi}{\lambda}x.$$

Учитывая, что отношение амплитуд напряжения и тока представляет собой волновое сопротивление линии, получим окончательно:

$$X_{вх} = -\rho \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} x. \tag{21}$$

Зависимость входного сопротивления линии без потерь от ее длины показана на фиг. 10. Из графика видно, что входное сопротивление линии может иметь любое значение от $+\infty$ до $-\infty$, т. е. в зависимости от длины линия может быть эквивалентна любой индуктивности или емкости. В тех точках, в которых реактивное сопротивление линии становится равным нулю или бесконечности, она по своим свойствам оказывается подобной колебательному контуру без потерь соответственно при последовательном или параллельном резонансе.



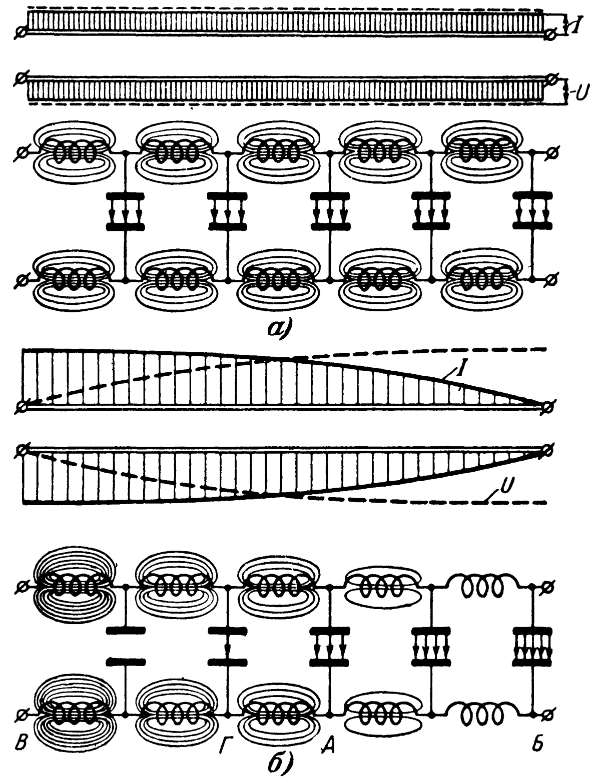
Фиг. 10. Зависимость входного сопротивления разомкнутой линии без потерь от ее длины.

Изменяя длину линии, можно менять частоту ее собственных колебаний, т. е. перестраивать ее с одной волны на другую. Поэтому такую линию часто называют настроенной.

По сравнению с обычным колебательным контуром линия имеет ряд существенных особенностей. Ее реактивное входное сопротивление становится равным нулю или бесконечности не на одной волне, как у обычного колебательного контура, а на бесконечной последовательности волн, целое число четвертей которых укладывается в линии, т. е. линия имеет бесконечное множество резонансных частот.

В режиме бегущих волн амплитуды тока и напряжения во всех точках линии одинаковы (фиг. 11,*а*), поэтому средние запасы электрической и магнитной энергии в распределенных емкостях и индуктивностях равны и входное сопротивление линии не имеет реактивной составляющей. В режиме стоячих волн распределение тока и напряжения в линии становится различным. В связи с этим происходит неравномерное распределение электрической и магнитной энергии по различным участкам линии. Это легко показать хотя бы на примере разомкнутой линии (фиг. 11,*б*). Участок *А—Б*

около конца линии обладает бо́льшим запасом электрической энергии, чем магнитной, а участок *В—Г* обладает бо́льшим запасом магнитной энергии, чем электрической. Если в линии со стоячими волнами укладывается целое число четвертей волн, то средний запас электрической и магнитной



Фиг. 11. Распределение электрической и магнитной энергии.

а — в линии с бегущей волной; *б* — в разомкнутой линии.

энергии в ней будут равны, и она не будет проявлять себя как реактивное сопротивление. Если же такую линию несколько укоротить или удлинить, то ее входное сопротивление станет реактивным. Характер его будет определяться преобладанием того или иного вида энергии, запасенной в отрезанном (прибавленном) участке.

Руководствуясь этим, всегда легко определить характер входного сопротивления линии со стоячими волнами.

3. Явления в линии, короткозамкнутой на конце

Как и в линии с разомкнутым концом, все особенности режима работы короткозамкнутой линии определяются условиями, создающимися на ее конце. Вследствие того, что противоположные точки на конце линии соединены перемычкой, сопротивление которой равно нулю, между ними не может существовать разности потенциалов, т. е.

$$U_{x=0}=0. \tag{22}$$

Такие же условия создались бы на конце линии, если бы вместо замыкающей перемычки там был подключен генератор, создающий напряжение, равное по величине и противоположное по знаку напряжению падающей волны. Такой «генератор» создает в линии отраженную волну, имеющую на конце фазу, противоположную фазе падающей волны. Поэтому при нахождении распределения тока и напряжения в линии надо в выражении (14) вместо знака плюс поставить знак минус.

Противофазная волна напряжения создает противофазную волну тока, двигающуюся в направлении, противоположном падающей волне. Поскольку изменение фазы на 180° равносильно изменению направления тока на обратное, то это означает, что токи падающей и отраженной волн совпадают по фазе, и в выражении (19) знак минус должен быть заменен на плюс. Иными словами, в случае короткого замыкания распределение тока получится таким, каким было распределение напряжения в разомкнутой линии, и наоборот. Поэтому, не повторяя выкладок предыдущего параграфа, можно написать:

$$u_x=-2U_m\sin\frac{2\pi}{\lambda}x\cdot\sin\omega t; \tag{23}$$

$$i_x=2I_m\cos\frac{2\pi}{\lambda}x\cdot\cos\omega t. \tag{24}$$

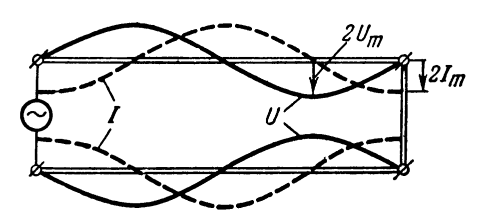
Сдвиг во времени тока и напряжения на четверть периода указывает на реактивный характер входного сопротивления линии.

Характер распределения амплитуд токов и напряжений вдоль короткозамкнутой линии показан на фиг. 12. Отличие от предыдущего случая заключается в том, что U и I поме-

нялись местами. В связи с этим изменяется и характер входного сопротивления линии.

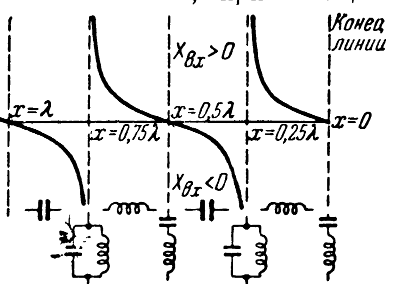
$$X_{вх} = \rho \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} x. \quad (25)$$

Выражение (25) * показывает, что линия может иметь входное сопротивление реактивного характера любой величины от $+\infty$ до $-\infty$, т. е. представлять собой любую емкость или индуктивность. При длине короткозамкнутой линии 0,25 λ, 0,75λ, 1,25λ и т. д. ее входное сопротивление равно бесконечности. При этом она ведет себя, как параллельный резонансный контур. Для генератора, работающего с частотой, при которой в линии укладывается несколько больше целого нечетного числа четвертей волн, она представляет индуктивное сопротивление, а для генератора, работающего с частотой, при которой в линии уложится несколько меньше, чем целое нечетное число четвертей волн, — емкостное сопротивление.



Фиг. 12. Распределение амплитуды напряжения и тока вдоль короткозамкнутой линии.

При длине линии 0,5λ, 1λ, 1,5λ и т. д. ее входное сопротивление равно нулю, и линия ведет себя аналогично последовательному резонансному контуру. Сопротивление ее генератору, создающему колебания с частотой меньше резонансной, имеет емкостный характер, а генератору, частота которого больше резонансной, — индуктивный характер.



Фиг. 13. Зависимость входного сопротивления короткозамкнутой линии без потерь от ее длины.

График зависимости входного сопротивления короткозамкнутой линии от ее длины приведен на фиг. 13. Здесь же

* Для того чтобы при этом не нарушалась принятая условность и индуктивному сопротивлению соответствовал знак „+“, а емкостному — знак „—“, в выражении (25) изменен знак.

указаны области, в которых линия эквивалентна последовательному или параллельному контуру, емкости или индуктивности.

Сравнение фиг. 10 и 13 показывает, что короткозамкнутые и разомкнутые линии взаимозаменяемы. Их свойства совпадают, если длина одной из них больше или меньше другой на четверть длины волны.

4. Линия, замкнутая на реактивную нагрузку

Если подключить к концу разомкнутой линии емкость или индуктивность, то из-за отсутствия необратимого поглощения энергии на конце линии в ней установятся стоячие волны, а ее входное сопротивление будет иметь чисто реактивный характер. В линии при этом изменится только распределение амплитуд стоячих волн. Если на конце разомкнутой линии ток всегда был равен нулю, то теперь этого не будет, так как через емкость или индуктивность, на которые нагружена линия, будет течь некоторый ток.

Для выяснения характера распределения стоячих волн при нагрузке линии на реактивное сопротивление удобно заменить включенную на конце нагрузку соответствующим отрезком разомкнутой линии.

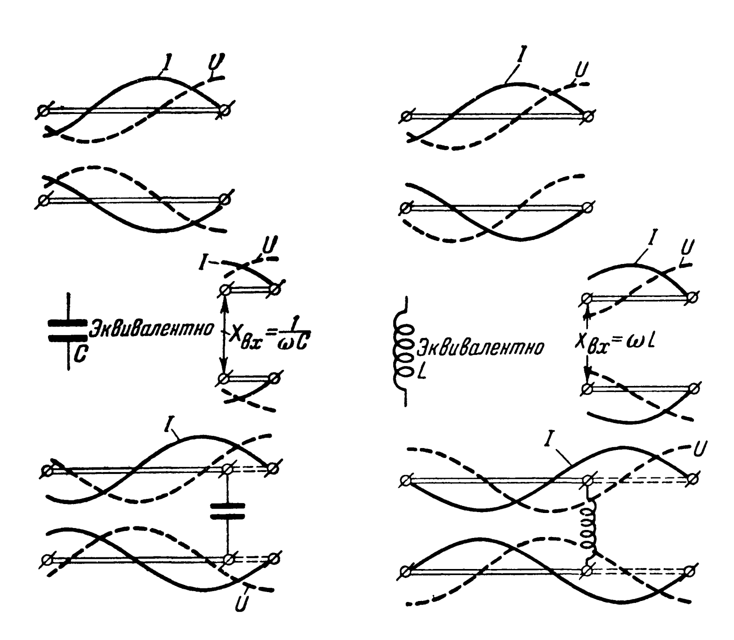
Из графиков, приведенных на фиг. 10, находим длину эквивалентного отрезка линии, реактивное сопротивление которого равно сопротивлению нагрузки, и присоединяем его мысленно к концу линии вместо нагрузки. На получившейся удлиненной разомкнутой линии строим распределение токов и напряжений. Та часть графика, которая расположится на реальном участке, и будет представлять новое распределение стоячих волн в линии.

Рассмотрим сначала случай, когда на конце линии включена емкость (фиг. 14).

Вследствие того, что включение емкости эквивалентно удлинению разомкнутой линии на величину менее 0,25 (фиг. 14), первый от конца минимум напряжения (или максимум тока) приблизится к концу линии, но будет находиться перед ним (фиг. 14). Таким образом, конец линии лежит на восходящей части кривой напряжения (если итти по направлению к началу линии) или на нисходящей части кривой тока.

При индуктивной нагрузке эквивалентное удлинение больше 0,25λ, и минимум напряжения сместится за конец

линии. Поэтому нагруженный конец окажется на нисходящей части кривой напряжения и на восходящей части кривой тока (фиг. 15).



Фиг. 14. Распределения амплитуды напряжения и тока вдоль линии, нагруженной на емкость.

Фиг. 15. График, поясняющий метод определения распределения амплитуды тока и напряжения вдоль линии, нагруженной на индуктивность.

Зная распределение тока и напряжения вдоль линии, ее волновое сопротивление, можно определить величину и характер нагрузки, включенной на конце.

5. Линия, нагруженная на произвольную нагрузку

В общем случае, когда на конце линии включена смешанная нагрузка, состоящая из активного и реактивного сопротивления, всегда часть энергии поглощается, а часть отражается, и в линии одновременно существуют стоячие и бегущие волны, а ее входное сопротивление имеет как активную, так и реактивную составляющую.

При наличии отражения ток в произвольной точке линии, отстоящей на расстояние x от ее конца, представляет собой сумму токов падающей и отраженной волны:

$$i_x = i_{x\,пад} + i_{x\,отр} = A\cos\omega\left(t + \frac{x}{c}\right) + B\cos\omega\left(t - \frac{x}{c}\right), \quad (26)$$

где A — амплитуда падающей волны;
B — амплитуда отраженной волны.

Вследствие того, что отражается только часть энергии падающей волны, амплитуда отраженной волны составляет некоторую долю от амплитуды падающей волны

$$B = pA. \quad (27)$$

Множитель p, выражающий отношение амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей, называется *коэффициентом отражения.*

Поскольку и падающая и отраженная волны являются бегущими, то линия представляет для них сопротивление, равное волновому. Поэтому напряжение, создаваемое током падающей волны, равно:

$$u_{x\,пад} = i_{x\,пад}\cdot\rho = \rho A\cos\omega\left(t + \frac{x}{c}\right). \quad (28)$$

Что же касается напряжения, создаваемого током отраженной волны, то нужно заметить, что знак его всегда противоположен знаку тока. Физический смысл этого нетрудно понять. Например, если положительная полуволна напряжения падающей волны заставляет заряды в верхнем проводе двигаться к нагрузке, то положительная полуволна напряжения отраженной волны заставляет эти заряды двигаться к началу линии, в отрицательном направлении. Поэтому

$$u_{x\,отр} = -\rho\cdot i_{x\,отр} = -\rho B\cos\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) \quad (29)$$

и результирующее напряжение в произвольной точке линии

$$u_x = u_{x\,пад} + u_{x\,отр} = \rho\left[A\cos\omega\left(t + \frac{x}{c}\right) - B\cos\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right]. \quad (30)$$

Выражения (26) и (30) позволяют найти входное сопротивление линии в точке x:

$$Z_{x\,вх} = \frac{u_x}{i_x} = \rho\frac{A\cos\omega\left(t + \frac{x}{c}\right) - B\cos\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)}{A\cos\omega\left(t + \frac{x}{c}\right) + B\cos\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)}. \quad (31)$$

Поскольку это равенство справедливо в любой точке линии, то оно будет выражать сопротивление и на конце линии, если придать координате x нулевое значение. Но на конце включено сопротивление $Z_н$; следовательно,

$$Z_{x=0} = Z_н = \rho \frac{A - B}{A + B}. \qquad (32)$$

Отсюда легко найти, что коэффициент отражения

$$p = \frac{B}{A} = \frac{\rho - Z_н}{\rho + Z_н}. \qquad (33)$$

Это основная расчетная формула теории длинных линий.

Формула (33) позволяет, зная ρ и $Z_н$, всегда найти амплитуду и фазу отраженной волны, а следовательно, и построить распределение напряжения и тока, которые установятся в линии при данной нагрузке. Это в свою очередь позволяет определить все исходные данные для расчета согласования линии с нагрузкой.

Поскольку ρ имеет чисто активный характер, то коэффициент отражения может стать равным нулю только в том случае, если сопротивление нагрузки не будет содержать реактивной составляющей.

Распределение напряжения или тока в линии со стоячими и бегущими волнами принято характеризовать так называемым *коэффициентом бегущей волны*, равным отношению напряжений или токов в пучности и узле:

$$k = \frac{U_{мин}}{U_{макс}} = \frac{I_{мин}}{I_{макс}}. \qquad (34)$$

В режиме бегущей волны $k = 1$, а в режиме стоячих волн $k = 0$.

Коэффициент бегущей волны характеризует степень рассогласования линии с нагрузкой. Поскольку узел возникает там, где отраженная волна вычитается из падающей, а пучность там, где они складываются, то

$$U_{макс} = A + B \quad и \quad U_{мин} = A - B.$$

Поэтому коэффициент бегущей волны

$$k = \frac{A - B}{A + B}.$$

Разделив числитель и знаменатель на A, будем иметь выражение

$$k=\frac{1-\frac{B}{A}}{1+\frac{B}{A}},$$

и, подставив сюда

$$p=\frac{B}{A}=\frac{\rho-Z_н}{\rho+Z_н},$$

получим:

$$k=\frac{Z_н}{\rho}.$$

Следовательно, коэффициент бегущей волны показывает, во сколько раз сопротивление нагрузки больше или меньше волнового сопротивления линии. Определив его экспериментальным путем (см. § 9), легко ответить на вопрос, во сколько раз нужно изменить сопротивление нагрузки или волновое сопротивление линии для того, чтобы получить согласование.

На практике часто пользуются обратной величиной

$$\frac{1}{k}=\frac{U_{макс}}{U_{мин}},$$

называемой *коэффициентом стоячей волны.*

Для облегчения рассмотрения процессов, происходящих в длинных линиях, нагруженных на произвольную нагрузку, А. И. Вольпертом была построена специальная номограмма, приведенная на фиг. 16 (см. вклейку в конце книги).

На этой номограмме нанесены в относительных единицах:

1. Кривые, вдоль которых сохраняется неизменной величина реактивного сопротивления $\pm j\frac{X}{\rho}=\text{const}$ (кривые, расходящиеся веером из нижней точки номограммы). Соответствующие им значения $\frac{X}{\rho}$ отложены в месте пересечения кривых с большой окружностью. Символ $+j$ обозначает сопротивление индуктивного характера, а $-j$ — емкостного характера.

2. Кривые, вдоль которых сохраняется неизменным активная составляющая сопротивления $\frac{R}{\rho}=\text{const}$ (окружности,

проходящие через нижнюю точку номограммы). Соответствующие им величины отношений $\frac{R}{\rho}$ отложены на диаметре большой окружности.

3. Кривые постоянных коэффициентов бегущей (стоячей) волны, имеющие вид концентрических окружностей, нанесенных пунктиром. Соответствующие им значения коэффициентов следует читать по той же шкале, что и активные сопротивления.

4. На внешней окружности нанесены в относительном масштабе $\frac{l}{\lambda}$ размеры линии. Поскольку картина распределения токов и напряжений в линии повторяется через каждые полволны, то достаточно ограничиться рассмотрением только полуволновой линии. Поэтому вся окружность соответствует $\frac{l}{\lambda}=0{,}5$.

С помощью данной номограммы можно легко решить две основные задачи, которые возникают при конструировании антенно-фидерной системы: 1) по данному сопротивлению нагрузки и волновому сопротивлению линии найти коэффициент бегущей волны в фидере и входное сопротивление линии; 2) по картине распределения напряжения в линии и известному волновому сопротивлению линии определить сопротивление нагрузки.

Рассмотрим порядок решения первой задачи.

Находим точку на номограмме, соответствующую заданному сопротивлению нагрузки:

$$\frac{Z_н}{\rho}=\frac{R_н}{\rho}\pm j\frac{X_н}{\rho}.$$

Она лежит на пересечении кривых

$$\frac{R_н}{\rho}=\text{const} \quad \text{и} \quad \pm j\frac{X_н}{\rho}=\text{const}.$$

Из центра номограммы через найденную точку проводим радиус до пересечения с внешней окружностью. К точке пересечения радиуса с большой окружностью прибавляем дугу, соответствующую относительной длине линии, в сторону движения часовой стрелки. Из найденной точки на внешней окружности проводим радиус к ее центру.

Окружность постоянного коэффициента бегущей волны, проходящая через точку, соответствующую сопротивлению нагрузки, при пересечении со вторым радиусом даст точку, выражающую входное сопротивление линии. Сама же

окружность даст значение коэффициента бегущей волны, устанавливающейся в линии.

Вторая задача решается в таком порядке.

Проводим пунктирную окружность, соответствующую коэффициенту бегущей волны, устанавливающейся в линии. На дуге большой окружности находим точку, соответствующую относительному расстоянию от нагрузки до первого минимума напряжения в линии $\frac{l_{мин}}{\lambda}$. Это расстояние отсчитываем от нуля в направлении против часовой стрелки. Соединяем найденную точку с центром окружности. Точка пересечения радиуса с окружностью постоянного коэффициента бегущей волны даст величину сопротивления нагрузки, которое определяется по кривым постоянного активного и реактивного сопротивления, проходящим через данную точку.

6. Линия, нагруженная на активное сопротивление

Если линия нагружена на активное сопротивление, то известная доля энергии всегда поглощается в нем, и вдоль линии происходит перенос энергии. Однако в общем случае часть энергии падающей волны отражается обратно и возвращается к источнику. При этом в линии возникают стоячие волны. Следовательно в линии существуют одновременно бегущая волна, переносящая поглощаемую нагрузкой энергию, и стоячие волны, создаваемые отраженной волной. Входное сопротивление линии имеет активную и реактивную составляющие.

Эти же выводы можно сделать и на основании формулы (33), которая для случая активной нагрузки принимает вид:

$$p = \frac{\rho - R_н}{\rho + R_н}. \qquad (35)$$

Придавая различное значение величине $R_н$, можно легко рассчитать и построить картину распределения напряжения и тока в линии (фиг. 17). При замыкании линии накоротко ($R_н = 0$) коэффициент отражения равен единице и в линии существуют только стоячие волны. С увеличением сопротивления нагрузки до $R_н = \rho$ числитель в выражении (35) уменьшается, а знаменатель возрастает, и вся дробь, оставаясь положительной по величине, стремится к нулю. Когда

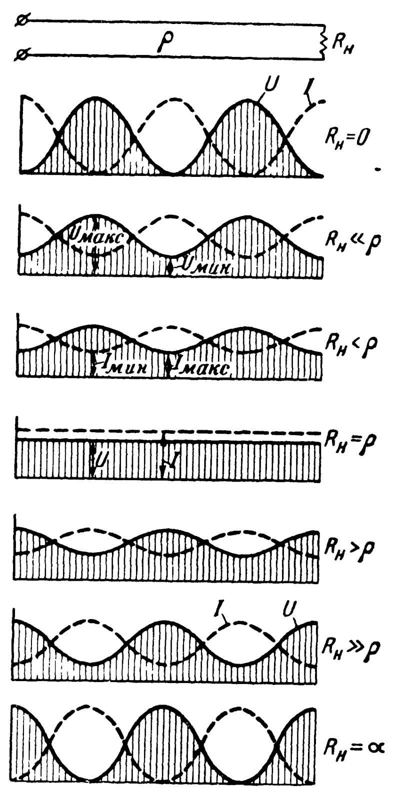
сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению линии, коэффициент отражения равен нулю, и в линии существует только бегущая волна.

Таким образом, условие согласования линии с нагрузкой состоит в том, что последняя должна иметь чисто активный характер и быть равной волновому сопротивлению линии.

Непосредственно отсюда вытекают два очень важных следствия:

1. Две линии можно соединять, не создавая в месте соединения отражений энергии, если их волновые сопротивления равны.

2. Когда к линии присоединяются две другие линии, соединенные параллельно друг с другом, то в месте разветвления отражений энергии не возникнет, если волновые сопротивления присоединяемых линий в 2 раза больше волнового сопротивления основной линии.



Фиг. 17. Распределение тока и напряжения вдоль линии, нагруженной на активное сопротивление различной величины.

Когда сопротивление нагрузки становится больше волнового сопротивления линии, коэффициент отражения снова возрастает, но знак его будет уже отрицательным. Это означает, что фаза отраженной волны изменилась на 180°. В результате максимумы и минимумы стоячих волн поменяются местами. При бесконечно большом сопротивлении нагрузки (что соответствует разомкнутой линии), коэффициент отражения становится равным единице, и в линии опять устанавливается только стоячая волна. Из графиков, приведенных на фиг. 17, видно, что значение активной и реактивной составляющей входного сопротивления такой линии зависит от ее длины и сопротивления нагрузки.

В качестве примера рассмотрим случай нагрузки четвертьволновой линии на чисто активное сопротивление R.

Подставляя в общее выражение (32) $l = 0{,}25\,\lambda$, получим:

$$Z_{вх} = \rho\,\frac{A\cos\omega\left(t+\frac{T}{4}\right) - B\cos\omega\left(t-\frac{T}{4}\right)}{A\cos\omega\left(t+\frac{T}{4}\right) + B\cos\omega\left(t-\frac{T}{4}\right)}.$$

Вспоминая, что

$$\cos(\omega t + 90^\circ) = -\sin\omega t$$

и

$$\cos(\omega t - 90^\circ) = \sin\omega t,$$

после сокращения числителя и знаменателя на $\sin\omega t$ найдем, что

$$Z_{вх} = \rho\,\frac{A+B}{A-B} = \rho\,\frac{1+p}{1-p}. \qquad (36)$$

Подставим сюда значение коэффициента отражения из формулы (35) и получим:

$$Z_{вх} = \frac{\rho^2}{R}. \qquad (37)$$

Этот важный результат будет неоднократно использован в дальнейшем.

7. Линия с потерями энергии

До сих пор мы рассматривали только идеальные линии, считая что тепловые потери и утечки в них отсутствуют. Обычно такая идеализация близка к истине, и на практике чаще всего пользуются для расчета формулами, выведенными в таком предположении. Это будет тем более справедливо, чем короче линия, больше диаметр проводов и лучше изоляция. Но в некоторых случаях пренебрежение потерями в линии приводит к значительным отклонениям от истины.

В режиме бегущей волны потери приводят к постепенному уменьшению амплитуд тока и напряжения вдоль линии. Однако обычно потери не бывают значительными, и вызванное наличием их отклонение волнового сопротивления от расчетного практически мало заметно.

Несколько более существенное влияние оказывают потери на режим работы линии при стоячих волнах. В этом

режиме работы амплитуды напряжения и тока на отдельных ее участках резко возрастают, что приводит к значительному увеличению тепловых потерь в проводах линии. Увеличение напряжения приводит к росту мощности потерь за счет утечек через изоляторы.

В результате к. п. д. линии значительно снижается по сравнению с режимом бегущей волны. Отсюда следует, что линию, используемую для передачи энергии, всегда желательно ставить в режим бегущей волны. Если же это осуществить не удается, то нужно стремиться по возможности сделать ее короче и обратить особое внимание на изоляцию проводов.

Наличие необратимых потерь приводит к тому, что входное сопротивление линии, помимо реактивной, всегда имеет еще и активную составляющую. Поэтому при последовательном резонансе, как и у колебательных систем с сосредоточенными постоянными, входное сопротивление линии не будет равно нулю, а при параллельном резонансе — не будет становиться бесконечно большим.

На фиг. 18 показана зависимость входного сопротивления разомкнутой и короткозамкнутой линии с потерями от ее длины. Сравнение этого графика с характеристиками идеальных линий, приведенных на фиг. 10 и 13, показывает, что наличие потерь в линии приводит к тому, что:

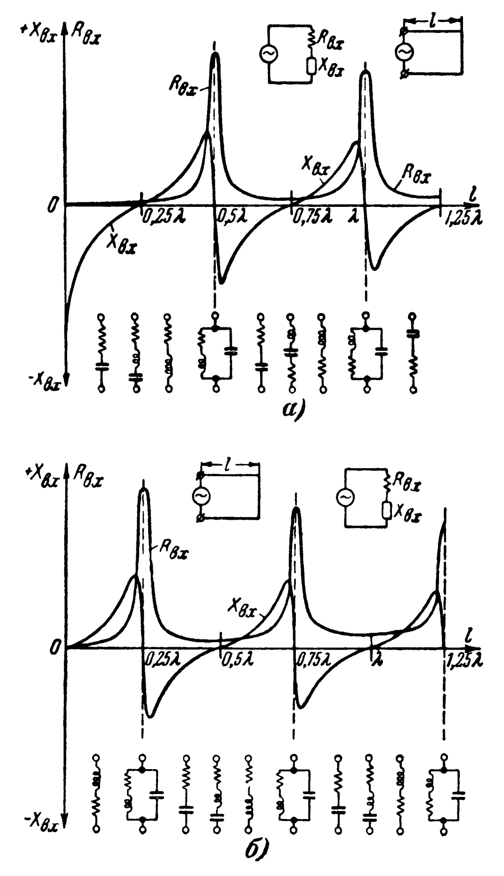
1. Входное сопротивление линии имеет активную составляющую, которая с увеличением длины линии при последовательном резонансе возрастает. Активная часть входного сопротивления линии при параллельном резонансе с увеличением длины линии уменьшается, и резонансная характеристика становится менее острой.

2. Закон изменения реактивной части входного сопротивления линии мало отличается от изменения реактивной части входного сопротивления идеальной линии за исключением узкой области вблизи точек параллельного резонанса. Здесь реактивное сопротивление вместо того, чтобы уйти в бесконечность, резко падает до нуля, а затем также резко возрастает, меняя свой знак. В точках резонанса реактивное сопротивление линии всегда равно нулю.

Это показывает, что за исключением узкой области около точек параллельного резонанса для расчета реактивной части входного сопротивления линии можно пользоваться формулами идеальной линии (21) или (25).

Отсюда также видно, что характерным признаком как последовательного, так и параллельного резонанса в линии

является прохождение через нуль реактивной части ее входного сопротивления. При этом линия представляет собой чисто активное сопротивление для источника питания.



Фиг. 18. Зависимость активного и реактивного сопротивлений линии с потерями от ее длины.

а — для разомкнутой линии; *б* — для линии, замкнутой на конце.

Необходимо отметить, что при параллельном резонансе входное сопротивление линии в сотни, а иногда и в тысячи раз больше входного сопротивления линии при последовательном резонансе. Поэтому нагрузка генератора с изменением длины волны может чрезвычайно резко изменяться.

Теперь подведем краткие итоги.

1. В длинных линиях существуют два основных режима работы: режим бегущих и стоячих волн. В режиме бегущей волны энергия без отражения передается от генератора к нагрузке, где полностью поглощается. С точки зрения передачи энергии этот режим является наиболее благоприятным. Напряжение и ток в каждой точке линии повторяют с запозданием закон изменения напряжения и тока на входе, поэтому фазы их в различных точках линии различны. Входное сопротивление линии имеет чисто активный характер и не зависит от частоты. Из-за этого ее часто называют *апериодической, ненастраивающейся* или *нерезонансной.*

2. Режим стоячих волн характеризуется отражением энергии от нагрузки. При этом амплитуды напряжения и тока в различных точках линии неодинаковы, а максимумы тока и напряжения сдвинуты друг относительно друга на четверть волны. Входное сопротивление линии зависит от ее длины и может иметь либо преимущественно реактивный, либо активный, либо смешанный характер. Фаза колебаний во всех точках линии одинакова. В результате увеличения напряжения и тока на отдельных участках линии по сравнению с режимом бегущей волны потери в линии значительно возрастают и к. п. д. падает.

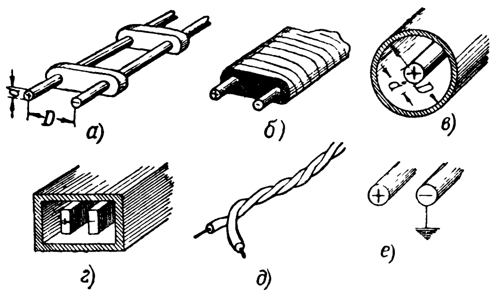
Линия, работающая в режиме стоячих волн, представляет собой резонансную систему на всех волнах, целое число четвертей которых укладывается вдоль нее. Характер резонанса изменяется через четверть длины волны; в одном случае входное сопротивление невелико, во втором, наоборот, имеет весьма большую величину, но в обоих случаях оно носит чисто активный характер. Вследствие этого линии со стоячими волнами часто называют *настроенными* или *резонансными.*

3. В общем случае, когда линия не согласована с нагрузкой, в ней имеют место как стоячие, так и бегущие волны и ее входное сопротивление имеет как активную, так и реактивную составляющие. По характеру распределения напряжения или тока можно определить величину и характер нагрузки.

8. Практические линии

Конструктивно линии могут выполняться весьма разнообразно. Это не приводит к изменению физической сущности явлений, происходящих в них, и все общие выводы и расчетные соотношения остаются для них в силе.

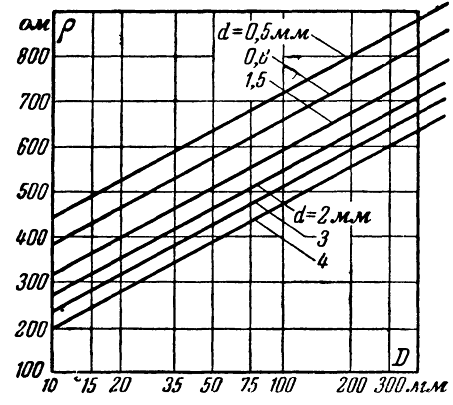
На фиг. 19 изображены некоторые наиболее употребительные типы длинных линий. На фиг. 19,*а* показана двух-



Фиг. 19. Конструктивное выполнение длинных линий.

а — симметричная двухпроводная воздушная линия; *б* — симметричная линия, провода которой заварены в диэлектрик; *в* — коаксиальная линия (концентрический кабель); *г* — симметричная линия с ленточными проводниками, заключенными в экран; *д* — витая двухпроводная линия; *е* — двухпроводная линия с заземленным проводом.

проводная симметричная воздушная линия. В зависимости от мощности генератора и требуемого волнового сопротивления подбирается диаметр ее проводов и расстояние между ними. Подобные линии просты и применимы на всех волнах вплоть до метрового диапазона.



Фиг. 20. График для расчета волнового сопротивления двухпроводных воздушных линий.

Практически удается построить воздушные двухпроводные линии с волновым сопротивлением, лежащим в пределах от 300 до 800 *ом*. На фиг. 20 приведен график для расчета волновых сопротивлений линий в зависимости от расстояния между проводами при заданном их диаметре. Желательно, чтобы провода линии были эмалированы для предохранения от коррозии, которая в сильной степени увеличивает потери в линии.

На работу открытых линий значительное влияние оказывают климатические условия. При большой влажности

или обледенении потери возрастают в несколько раз. Однако даже в самых неблагоприятных случаях потери при режиме бегущей волны оказываются весьма малыми, и практически их можно не учитывать.

Потери всегда можно уменьшить, увеличив диаметр проводов. Но при этом возрастает вес линии. Наиболее выгодной является линия с волновым сопротивлением $\rho = 600$ *ом*, обладающая при небольшом весе достаточно малыми потерями. Для получения такого волнового сопротивления нужно, чтобы отношение расстояния между проводами к их диаметру $\frac{D}{d}$ равнялось 165.

Следует всегда иметь в виду, что нормальный режим работы двухпроводной воздушной линии возможен только при сохранении полной симметрии ее проводов относительно земли. Поэтому всегда стараются сделать так, чтобы провода были расположены параллельно земле, а близлежащие предметы по возможности находились бы на одинаковом расстоянии от них.

При работе двухпроводной воздушной линии в режиме стоячих волн потери энергии возрастают иногда более чем в 5 раз. Поэтому, если длина фидерной линии составляет несколько длин волн, с потерями приходится считаться. Возрастание напряжения заставляет обратить особое внимание на изоляцию проводов.

Реже встречаются двухпроводные линии, провода которых заварены в диэлектрик фиг. 19,*б*. Подобные линии обычно обладают волновым сопротивлением порядка 50—300 *ом*, что очень удобно для согласования их с целым рядом антенн. Достоинством таких линий является также то, что они не подвержены влиянию климатических условий и удобны для монтажа, а основным недостатком то, что они имеют весьма большое затухание вследствие значительных диэлектрических потерь в изоляции.

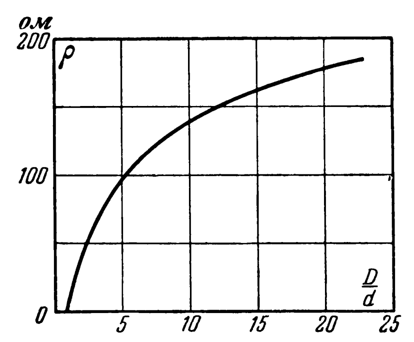
Коаксиальная линия (коаксиальный или концентрический кабель) представляет собой пример несимметричной линии (фиг. 19,*в*). В нем один провод помещен внутри второго, выполняемого обычно в виде гибкой металлической оплетки. Напряжение от генератора подводится к внешней и внутренней жиле кабеля. Электромагнитное поле локализуется внутри кабеля благодаря экранирующему действию внешней оплетки. Это является существенным достоинством концентрической линии, полностью лишенной потерь на излучение. Внешняя оплетка может быть заземлена.

Основной недостаток коаксиальных кабелей заключается в том, что они обладают большими потерями в диэлектрике. Наименьшими потерями обладают коаксиальные кабели с чешуйчатыми керамическими изоляторами или диэлектрическими шайбами, располагаемыми на некотором расстоянии друг от друга.

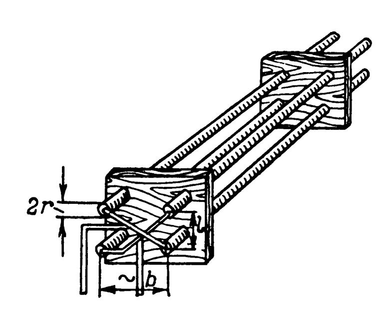
Зависимость волнового сопротивления концентрической линии от ее параметров определяется формулой

$$\rho = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon}} \lg \frac{D}{d}. \qquad (38)$$

На фиг. 21 приведен график для расчета волновых сопротивлений концентрических линий. Стандартные кабели, выпускаемые промышленностью, имеют волновое сопротивление от 40 до 150 *ом*.



Фиг. 21. График для расчета волнового сопротивления концентрических линий.



Фиг. 22. Четырехпроводная линия.

Для мощных передатчиков двухпроводная линия часто выполняется в виде двух широких лент, помещенных в сплошной металлический экран (фиг. 19,*г*). Для передачи сравнительно небольшой мощности часто применяются шнуры, свитые из двух гибких проводов в резиновой изоляции (фиг. 19,*д*). Волновое сопротивление такого шнура обычно лежит в пределах от 50 до 80 *ом*. Однако такая линия обладает большими диэлектрическими потерями.

В тех случаях, когда требуется уменьшить волновое сопротивление линии передачи, можно соединять линии параллельно. На фиг. 22 изображен пример такой линии, составленной из двух пар проводов. Существенно отметить, что параллельно соединяются провода, расположенные по диаго-

нали. Эта мера позволяет сохранять симметрию всей системы, так как емкости обоих пар проводов относительно земли будут одинаковы. Жесткость всей конструкции придается рамочными изоляторами, которые располагаются на расстоянии 1,5—2 *м* друг от друга.

Волновое сопротивление такой четырехпроводной линии находится по формуле

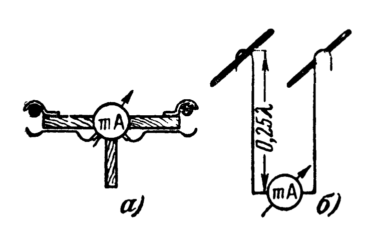
$$\rho = 69 \lg \frac{b^2}{r^2} \cdot \frac{l^2}{b^2 + l^2}, \qquad (39)$$

где b, r, l — размеры, приведенные на фиг. 22.

Выбор того или иного типа фидерной линии зависит в первую очередь от вида антенны, от мощности передатчика, от расстояния между перадатчиком и антенной, от рода работы и целого ряда конструктивных и эксплуатационных соображений.

9. Основные измерения в фидерных линиях

Для того чтобы правильно настроить, согласовать линию с антенной и проверить режим ее работы, необходимо уметь выполнять некоторые основные измерения и в первую очередь определять характер распределения тока или напряжения вдоль нее. Последнее можно сделать с помощью несложного приспособления, которое нетрудно изготовить самому.



Фиг. 23. Индикаторы для определения распределения напряжения вдоль линии.

а — емкостное подключение прибора к линии; *б*—подключение с помощью четвертьволнового шлейфа.

На легком деревянном Т-образном основании крепится тепловой или термоэлектрический прибор (фиг. 23,*а*). К поперечной планке основания привинчиваются два крюка, с помощью которых все устройство подвешивается на провода линии. Для того чтобы цепь прибора как можно меньше шунтировала линию и не вносила заметных искажений в режим ее работы, проводники, идущие от зажимов прибора непосредственно к линии, не присоединяются, а находятся на небольшом расстоянии от ее проводов. Некоторая доля энергии через емкости, образованные проводами линии и индикатора, ответвляется в его цепь. Характер распределения напряжения вдоль линии

определяется путем передвижения индикатора вдоль проводов.

В том случае, когда прибор индикатора настолько груб, что емкость между проводами линии и прибора оказывается слишком малой для нормальной работы индикатора, можно сделать непосредственный контакт и последовательно с каждой стороны прибора включить по конденсатору небольшой емкости.

Другой вариант аналогичного устройства изображен на рис. 23,*б*. В нем измерительный прибор включается в замыкающую перемычку четвертьволновой линии. Поскольку входное сопротивление короткозамкнутой четвертьволновой линии очень велико, то она не будет шунтировать линию при измерении.

Для того чтобы иметь возможность производить измерения на различных волнах, можно выполнить измерительную линию в виде тонкостенных вдвигающихся друг в друга трубок.

Наличие симметрии может быть определено при снятии картины распределения напряжения вдоль линии. При асимметрии системы максимумы и минимумы напряжения в обоих проводах сдвинуты друг относительно друга, вследствие чего результирующая разность потенциалов между проводами в этом случае будет иметь раздвоенные максимумы и минимумы.

Вместо стрелочного индикатора часто пользуются неоновой лампочкой или лампочкой накаливания от карманного фонарика, подключаемых к проводу линии с помощью крюка, укрепленного на шесте. Цепь лампочки замыкается через емкость между небольшой пластинкой, укрепленной на конце шеста, и землей. Для зажигания неоновой лампочки обычно оказывается достаточно двух-трех витков связи или небольших усиков из тонкого провода, припаиваемых к цоколю лампы. По интенсивности свечения лампочки судят о распределении потенциала вдоль провода линии.

Определение характера распределения напряжения в линии производится обычно в относительных единицах, это позволяет судить о согласовании линии с нагрузкой и о характере реактивной составляющей ее входного сопротивления в различных точках.

В случае активной нагрузки вопрос о том, больше или меньше сопротивление нагрузки, чем волновое сопротивление линии, определяется положением ближайшего узла

или пучности относительно конца линии. Когда сопротивление нагрузки $R_н$ меньше ρ, то на конце линии будет находиться узел напряжения, если же сопротивление $R_н$ больше ρ, то на нагруженном конце линии будет пучность напряжения.

В том случае, когда нагрузка имеет как активную, так и реактивную составляющую, их величину можно определить, пользуясь номограммой Вольперта. Однако на практике часто достаточно знать только характер реактивной составляющей сопротивления нагрузки. Последнее можно определить непосредственно при измерениях: если пучность напряжения находится ближе к нагруженному концу линии, чем узел, то реактивная часть нагрузочного сопротивления имеет емкостной характер. Когда ближе к концу располагается узел напряжения, реактивная составляющая входного сопротивления имеет индуктивный характер.

Волновое сопротивление фидерной линии можно определить путем измерения входного сопротивления линии с разомкнутым концом, а затем с короткозамкнутым концом:

$$\rho = \sqrt{Z_{к.з} \cdot Z_{x\,x}}, \qquad (40)$$

где $_{к.з}$ — входное сопротивление короткозамкнутой линии;
$Z_{x.x}$ — входное сопротивление разомкнутой линии.

Формула эта непосредственно вытекает из выражений ·21) и (25).

Для проведения этих измерений нужно иметь ламповый вольтметр и два амперметра с термопарой (или тепловых). Чтобы не вносить асимметрии в систему, нужно производить измерения, включая амперметры в оба провода линии.

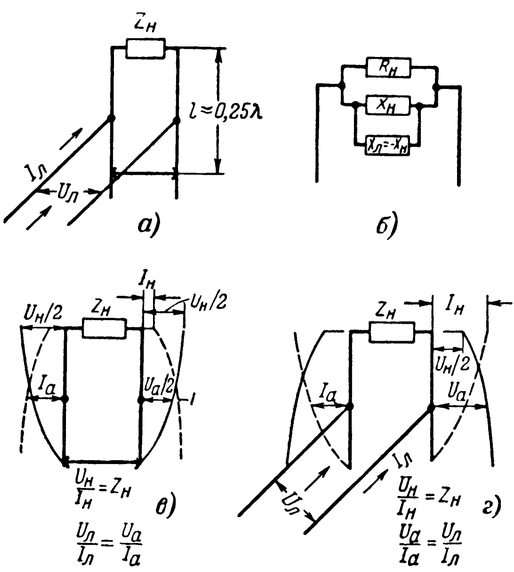
10. Специальные случаи применения длинных линий

Помимо передачи энергии от генератора к антенне, длинные линии находят широкое применение в качестве колебательных систем, согласующих устройств, фильтров и коммутирующих систем.

В качестве колебательных систем наиболее удобны четвертьволновые короткозамкнутые линии, так как они обладают минимальными размерами при параллельном резонансе. Основная область их применения — резонансные контуры в генераторах ультракоротких волн. Благодаря

малым потерям они обладают более высокой добротностью, чем контуры с сосредоточенными постоянными.

На волнах дециметрового диапазона двухпроводные линии вытесняются коаксиальными линиями. Это объясняется тем, что на столь коротких волнах расстояние между проводами становится соизмеримым с длиной волны, вследствие чего возникают весьма значительные потери на излучение.



Фиг. 24. Резонансные трансформаторы.

Наибольший интерес с точки зрения практики антенно-фидерных систем представляет применение длинных линий в качестве согласующих устройств.

Передача энергии по линии без отражения возможна только при условии, что сопротивление нагрузки имеет чисто активный характер и равно волновому. На практике входное сопротивление антенны часто отличается от волнового сопротивления линии. Поэтому непосредственного согласования последней с антенной достигнуть не удается и приходится использовать специальные согласующие приспособления.

Простейшим согласующим устройством является так называемый резонансный трансформатор (фиг. 24,*а*). К нагрузке подключается короткозамкнутая или разомкнутая

линия (шлейф), длина которой близка к четверти волны. Основная питающая линия присоединяется к шлейфу.

Для получения согласования прежде всего необходимо настроить цепь нагрузка — согласующая линия. Если нагрузка представляет собой чисто активное сопротивление, то длина согласующей линии устанавливается вначале равной 0,25λ. Если нагрузка имеет реактивную составляющую, то длина согласующей линии берется несколько больше или меньше 0,25λ. При этом она становится эквивалентна некоторой дополнительной реактивной нагрузке, сопротивление которой подбирается равным по величине и обратным по характеру реактивной составляющей сопротивления антенны. Если данное условие выполнено, то линия и нагрузка становятся эквивалентными параллельному резонансному контуру (фиг. 24,*б*).

Этим решается первая часть задачи, т. е. нагрузка (под которой теперь необходимо подразумевать нагрузочное сопротивление вместе с согласующей линией) представляет собой резонансную систему, входное сопротивление которой имеет чисто активный характер.

Теперь остается решить вторую часть задачи — подключить основную линию так, чтобы входное сопротивление согласующей линии с нагрузкой было равно волновому сопротивлению питающей линии.

В согласующей линии устанавливается стоячая волна тока и напряжения с пучностью тока и узлом напряжения у короткозамкнутого конца. Поскольку длина линии близка к 0,25λ, узел стоячей волны тока и пучность напряжения окажутся у нагрузки (фиг. 24,*в*). На этом конце линии согласно закону Ома отношение напряжения к току должно быть равно сопротивлению нагрузки. Если двигаться от нее к закороченному концу, то это отношение будет уменьшаться до нуля на противоположном конце линии. Если сопротивление нагрузки больше волнового сопротивления питающей линии, то на согласующей линии должна найтись точка, в которой отношение напряжения к току (входное сопротивление) точно равно волновому сопротивлению питающей линии. При соединении их в этой точке линия окажется согласованной с нагрузкой.

Согласующая линия практически лишена потерь, поэтому вся энергия, передаваемая без отражения по линии, поглотится в нагрузке. В тех случаях, когда сопротивление нагрузки меньше волнового сопротивления линии, нужно применять разомкнутый четвертьволновый шлейф

(фиг. 24,*г*). Вследствие обратного характера распределения тока и напряжения в разомкнутой линии по сравнению с короткозамкнутой, такой шлейф будет трансформировать сопротивление нагрузки в сторону увеличения.

Благодаря тому, что согласующие линии трансформируют сопротивление, их часто называют трансформаторами сопротивлений или согласующими трансформаторами.

Настройка и регулировка согласующих трансформаторов подобного типа осуществляются следующим образом.

Сначала нужно произвести настройку цепи: нагрузка — согласующий трансформатор. Для этого включают в закорачивающую перемычку прибор (при работе по схеме фиг. 24,*в*) и изменением параметров нагрузки или длины согласующей линии производят настройку всей системы в резонанс по максимальному показанию прибора. Питающая линия на это время подключается примерно в середине согласующей линии. Настройка производится при слабой связи с генератором.

При работе с разомкнутым трансформатором настройку нужно производить по максимальному показанию лампового вольтметра или по максимальному показанию прибора в цепи нагрузки. Если по каким-либо соображениям использовать прибор неудобно, то грубо настройку можно производить по свечению индикаторной лампочки, связанной с цепью согласующего трансформатора.

После того как трансформатор с нагрузкой настроен, нужно более точно подобрать место подключения питающей линии. Для этого передвигают ее вводы вдоль по согласующей линии до получения режима бегущей волны. Если при этом чисто бегущей волны получить не удается, то это указывает на неточную настройку трансформатора. Контроль за режимом питающей линии следует осуществлять с помощью индикатора бегущей волны или индикаторной лампочки.

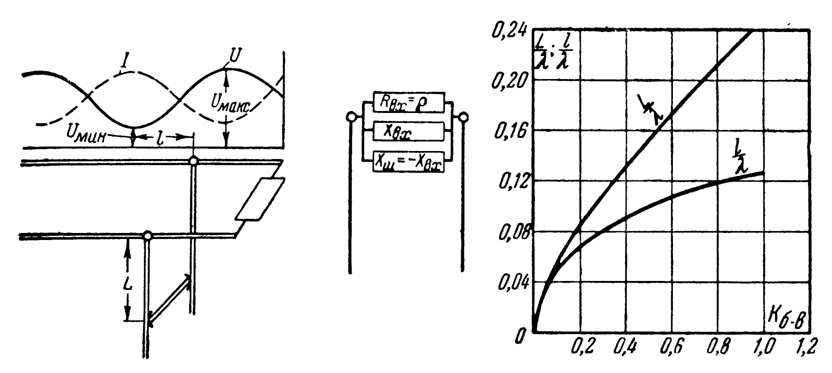
Резонансные трансформаторы работают хорошо при коэффициентах трансформации более четырех. При меньших коэффициентах трансформации нужно добиваться согласования с помощью реактивного шлейфа.

Идея согласования с помощью реактивного шлейфа заключается в следующем. Пусть в нагруженной линии установилась комбинированная волна, состоящая из бегущей и стоячей волны. Входное сопротивление такой линии изменяется от точки к точке.

В некотором месте активная составляющая его равна волновому сопротивлению линии. Чтобы осуществить со-

гласование, нужно скомпенсировать в этой точке реактивную составляющую входного сопротивления. Для этого к ней подключается короткозамкнутый или разомкнутый шлейф (фиг. 25), реактивное сопротивление которого равно по величине и противоположно по знаку реактивной составляющей входного сопротивления линии. При этом в линии устанавливается чисто бегущая волна, и вся энергия от генератора передается без отражения к нагрузке.

На фиг. 26 приведен график, облегчающий нахождение места присоединения шлейфа и его длины. Определив коэффициент бегущей волны, находят по графику отношение $\frac{l}{\lambda}$, определяющее расстояние от узла напряжения до точки, к которой должен быть подключен шлейф. По вто-



Фиг. 25. Согласование линии с нагрузкой с помощью реактивного шлейфа.

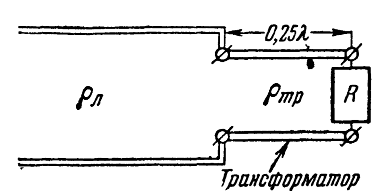
Фиг. 26. График для расчета точки присоединения и длины шлейфа.

рой кривой графика фиг. 26 определяют электрическую длину L/λ шлейфа. Шлейф может располагаться около любого узла напряжения, но для уменьшения потерь желательно, чтобы он был у ближайшего узла к концу линии. Длина шлейфа также должна быть минимальной. Чтобы длина шлейфа не превышала четверти волны, его нужно брать короткозамкнутым, когда сопротивление должно быть индуктивного характера, и разомкнутым, — когда емкостного.

Характер входного сопротивления линии в данной точке может быть определен по распределению напряжения в линии. В том случае, когда точка присоединения шлейфа находится на нисходящей части кривой напряжения (считая

от конца линии), то часть линии, оставшаяся за этой точкой, имеет реактивную составляющую входного сопротивления емкостного характера. Если же точка лежит на восходящей части кривой напряжения, то реактивное сопротивление линии в данной точке имеет индуктивный характер.

Практически согласование шлейфом производится в следующей последовательности. Сначала устанавливают слабую связь с передатчиком и присоединяют нагрузку к линии. С помощью индикатора бегущей волны снимают распределение напряжения в линии. По найденному коэффициенту бегущей волны с помощью графика фиг. 26 находят положение шлейфа и его длину. В зависимости от характера реактивной составляющей входного сопротивления в найденной точке присоединяют короткозамкнутый или разомкнутый шлейф. Следует заметить, что основное значение имеет правильность определения точки подключения шлейфа, длина же его легко может быть подобрана при регулировке системы по контролю режима в питающем фидере. Чаще всего употребляются короткозамкнутые шлейфы, составленные из раздвигающихся трубок.



Фиг. 27. Четвертьволновый трансформатор.

Приведенные графики справедливы только для шлейфов, волновое сопротивление которых равно волновому сопротивлению линии.

Третий вид согласующего трансформатора предназначается, как правило, для работы с чисто активной нагрузкой, хотя небольшое реактивное сопротивление может быть компенсировано так же, как это производилось при работе с первым типом трансформатора. Этот вид согласующего устройства может быть назван четвертьволновым трансформатором (фиг. 27).

В § 8 было найдено, что входное сопротивление четвертьволновой линии, нагруженной на активное сопротивление $R_н$, равно

$$Z_{вх} = R_{вх} = \frac{\rho_{тр}^2}{R_н}, \qquad (41)$$

где ρ — волновое сопротивление линии.

Таким образом, сопротивление нагрузки трансформируется четвертьволновой линией в активное сопротивление

другой величины. Подбирая волновое сопротивление линии трансформатора, можно сделать его входное сопротивление равным волновому сопротивлению питающей линии.

Волновое сопротивление линии трансформатора при этом должно быть равным

$$\rho_{тр} = \sqrt{R_н \rho_л}. \qquad (42)$$

Часто сопротивление нагрузки непосредственно узнать не удается. Тогда поступают следующим образом. Подключают нагрузку непосредственно к питающей линии и с помощью индикатора бегущей волны измеряют коэффициент бегущей волны

$$k = \frac{R_н}{\rho_л},$$

откуда нагрузочное сопротивление

$$R_н = k\rho_л.$$

Фиг. 28. Фильтрующее устройство из шлейфов.

Подставляя это выражение в формулу (42), получим выражение для вычисления волнового сопротивления трансформатора

$$\rho_{тр} = \rho_л \sqrt{k}. \qquad (43)$$

Для того чтобы иметь возможность перестраивать трансформатор на различные волны, его часто выполняют в виде раздвижных трубок.

В коротковолновых радиостанциях длинные линии находят применение также в качестве фильтров.

К фильтрующему устройству обычно предъявляется требование, — пропускать волны, имеющие длину λ_1 и не пропускать волны с длиной λ_2. Задача эта может решаться, например, с помощью двух шлейфов, подключаемых к основной линии, как это показано на фиг. 28. Разомкнутый шлейф длиной в $0{,}25\,\lambda_2$ представляет для волны λ_2, идущей слева, короткое замыкание, и она полностью отразившись от точек *АА*, пойдет обратно. Если λ_1 больше λ_2, то для волны λ_1 первый шлейф будет представлять некоторое емкостное сопротивление. Подключив параллельно короткозамкнутый индуктивный шлейф и подобрав его сопротивление равным сопротивлению первого шлейфа, мы получим

параллельный резонансный контур, который для волны λ_1 будет представлять бесконечно большое сопротивление. Поэтому его шунтирующим действием для волны λ_1 можно пренебречь, и вся энергия будет проходить за фильтр к нагрузке.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ

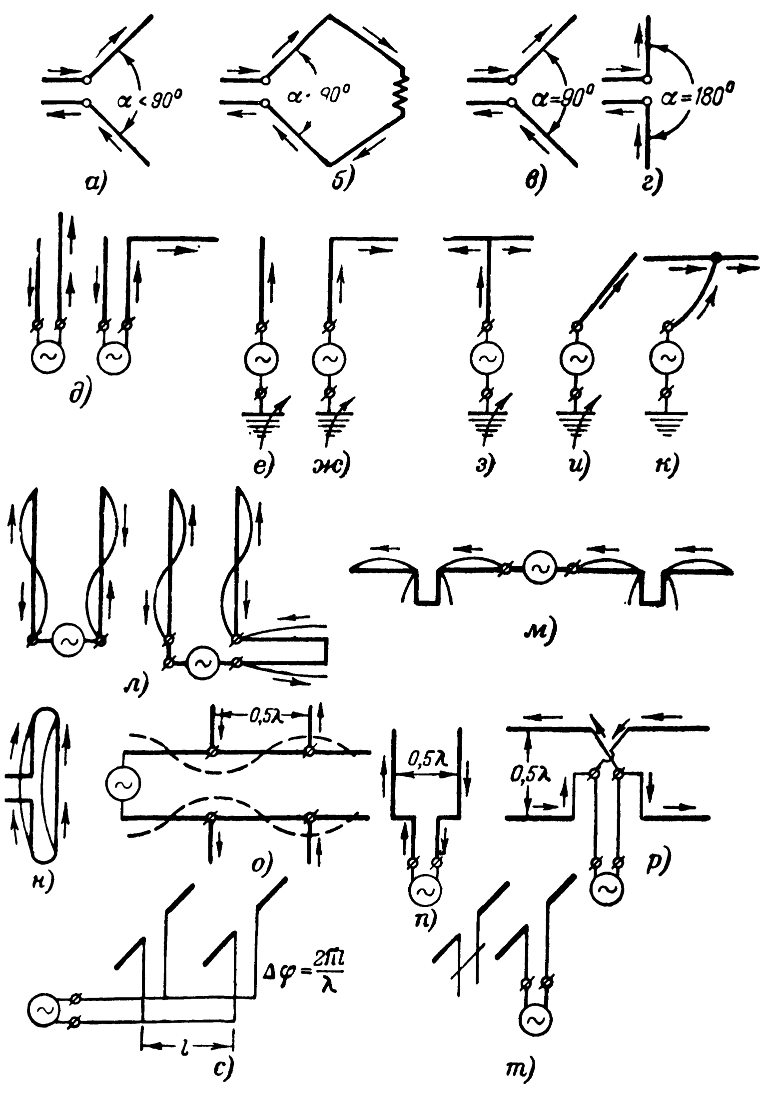
11. Основные пути создания излучающих устройств

При использовании проводов в качестве линии передачи всегда стремятся сделать так, чтобы система была неизлучающей. Теперь ставится противоположная задача: использовать электрические колебания в проводах, подключенных к генератору, для создания интенсивного излучения электромагнитных волн в окружающее пространство.

Для осуществления этого нужно устранить одну из причин, лишавших фидер излучающих свойств. При этом представляются следующие возможности:

1. Раздвинуть провода линии на некоторый угол, благодаря чему направление токов в них перестанет быть противоположным. Этот принцип положен в основу работы V-образных и ромбических антенн, излучающие провода которых располагаются под острыми углами друг к другу (фиг. 29,*а* и *б*), в уголковой антенне Пистолькорса, где угол между проводами сделан равным 90° (фиг. 29,*в*), и в симметричном вибраторе (диполе), который образуется при разведении проводов на 180° (фиг. 29,*г*). Стрелками указано направление токов в антеннах.

2. Исключить компенсирующее действие второго провода, укоротив его или вовсе исключив из системы. Сокращение одного из проводов впервые мы встречаем в так называемых антеннах «с верхним светом», предложенных М. А. Бонч-Бруевичем (фиг. 29,*д*). Полное уничтожение второго провода приводит к получению так называемого несимметричного вибратора (фиг. 29,*е*). Все антенны, использующие данный принцип работы, относятся к классу несимметричных антенн. К ним принадлежат Г-образные антенны (фиг. 29,*ж*), Т-образные антенны (фиг. 29,*з*), наклонные антенны (фиг. 29,*и*), антенна с отводом (фиг. 29,*к*) и ряд других. Обычно при питании этих антенн второй за-



Фиг. 29. Типы излучающих систем.

жим генератора заземляется (земля играет роль второго провода).

3. Сделать токи в обоих проводах синфазными. Для этого достаточно, например, согнуть участок одного из проводов линии длиной в полволны в неизлучающий шлейф (фиг. 29,*л*). Тогда соседние участки проводов будут обтекаться синфазными токами, и они будут взаимно усиливать излучение. Эта идея находит широкое распространение в разнообразных направленных синфазных антенных системах, одна из которых приведена на фиг. 29,*м*, а также в шлейф-вибраторах, предложенных А. А. Пистолькорсом (фиг. 29,*н*).

4. Сделать расстояние между проводами, несущими противофазные токи, соизмеримым с длиной волны. Тогда волны, излученные обоими проводами по некоторым направлениям, приобретут значительную разность хода и не будут полностью взаимно уничтожаться.

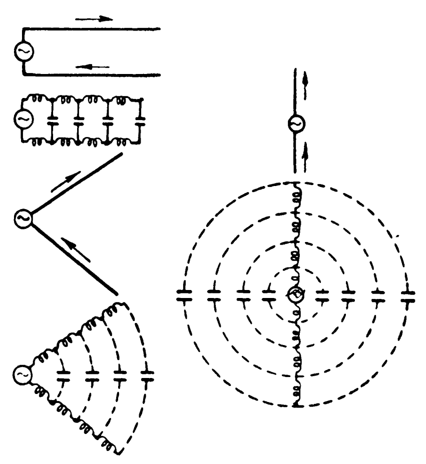
Более того, можно так подобрать расстояние между проводами, что по некоторым направлениям произойдет сложение волн от обоих проводов. Это широко используется в многочисленных направленных противофазных антеннах. Метод осуществления противофазных систем нетрудно понять из трех примеров, приведенных на фиг. 29. В антенне фиг. 29,*о* противофазность токов в вибраторах обеспечивается подключением их к фидеру на расстоянии в полволны. Антенна, изображенная на фиг. 29,*п*, представляет собой как бы фидер, расширенный на конце. В антенне фиг. 29,*р* противофазность токов обеспечивается перекрещиванием питающих проводов.

5. Изменять фазы токов в параллельных проводах. Самые разнообразные диаграммы направленности можно создать путем соответствующего выбора расстояния и разности фаз токов в системе двух или нескольких излучателей. Нужный сдвиг фаз токов в излучателях может бать, например, установлен в системе, приведенной на фиг. 29,*с*, подбором расстояния между точками подключения антенн к питающему фидеру, или настройкой с помощью шлейфа вибратора, ток в котором наводится другим излучателем (фиг. 29,*т*). Эти принципы положены в основу работы антенн с однонаправленным излучением.

Часто встречаются антенные системы, которые используют одновременно несколько принципов построения излучающих устройств.

12. Симметричный вибратор (диполь)

Симметричный вибратор можно представить как длинную линию, разомкнутую на конце, провода которой развернуты на 180°. Благодаря этому направление токов в симметричных точках обеих половин вибратора становится одинаковым. Эквивалентная электрическая схема симметричного вибратора изображена на фиг. 30.

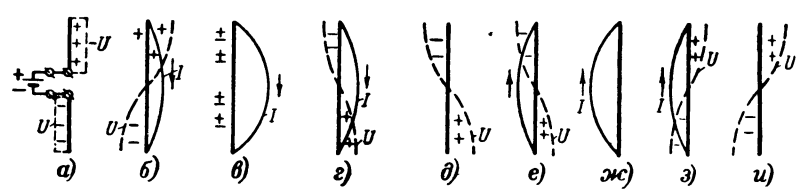


Фиг. 30. Эквивалентная схема симметричного вибратора.

Для того чтобы получить максимально интенсивные колебания в антенном проводе, а следовательно, и максимальное излучение, необходимо использовать явление электрического резонанса, т. е. возбуждать антенну э. д. с., имеющей частоту, равную частоте собственных колебаний антенны.

Чему же равна частота собственных колебаний антенны?

Присоединим обе половины симметричного вибратора к зажимам источника постоянной э. д. с. (фиг. 31,*а*). После того как распределенные емкости зарядятся и между обеими половинами возникнет разность потенциалов, отключим источник питания и замкнем обе половины короткой перемычкой (фиг. 31,*б*).



Фиг. 31. К пояснению распределения тока и напряжения в диполе.

Сейчас же распределенные емкости начнут разряжаться через провод антенны. Очевидно, что через отрезки провода, расположенные ближе к середине вибратора, будет разряжаться большее число емкостей, и разрядный

ток, протекающий через эти отрезки, будет иметь наибольшее значение, а на конце — спадать до нуля. Разрядный ток, проходя по распределенным индуктивностям, создает на них падение напряжения. Разность потенциалов между точками, равноудаленными от середины вибратора, будет возрастать с удалением их от нее, так как по мере удаления от середины складываются напряжения на большем числе распределенных индуктивностей (фиг. 31,*б*). Знак потенциала по обе стороны от середины будет различен, так как в одной половине ток течет к середине, в другой — от середины.

По мере разряда элементарных конденсаторов ток в проводе нарастает и достигает максимума, когда они полностью разряжаются. При этом вся энергия электрического поля, запасенная в емкости, переходит в энергию магнитного поля распределенных индуктивностей (фиг. 31,*в*).

Если вначале индуктивность проводов вибратора препятствовала нарастанию тока, то теперь она препятствует его уменьшению, Поэтому ток уменьшается постепенно, сохраняя прежнее направление (фиг. 31,*г*). За счет этого происходит перезарядка емкостей, и, когда ток спадает до нуля, емкости окажутся перезаряженными (фиг. 31,*д*). После этого процесс будет протекать в обратном направлении и т. д. (фиг. 31,*е*, *ж*, *з*, *и*).

Таким образом, в антенне возникнут электрические колебания. В процессе образования свободных колебаний в антенне установились стоячие волны тока и напряжения, причем вдоль ее длины уложилась половина волны тока и напряжения. Следовательно, собственная волна симметричного вибратора вдвое больше длины антенного провода, т. е.

$$\lambda_{соб} = 2l. \qquad (44)$$

Поэтому часто симметричный вибратор называют также полуволновым диполем, чем подчеркивается, что он вдвое короче длины своей резонансной волны. При превращении линии в излучающую систему — антенну — необратимые потери энергии в ней возрастут. К тепловым потерям добавятся потери на излучение. Поэтому вся мощность, потребляемая антенной,

$$P_A = P_\Omega + P_\Sigma, \qquad (45)$$

где P_Ω — мощность тепловых потерь, а P_Σ — мощность электромагнитного излучения. Увеличение необратимых потерь в системе можно трактовать как увеличение ее

активного сопротивления, т. е. можно считать, что полное активное сопротивление антенны

$$R_A = R_\Omega + R_\Sigma, \qquad (46)$$

где R_Ω — сопротивление тепловых потерь;

R_Σ — так называемое сопротивление излучения.

В системах с распределенными постоянными, в которых ток и напряжение меняются от точки к точке, целесообразнее всего определять активное сопротивление, исходя из энергетических соображений, используя закон Ленца, связывающий мощность активных потерь с током и сопротивлением:

$$P = \frac{1}{2} I^2 R.$$

Будем считать, что активное сопротивление антенны равно такому сосредоточенному сопротивлению, в котором при протекании тока, равного максимальному току в антенне, будет выделяться та же мощность, что и в антенне. На основании закона Ленца такое сопротивление будет равно:

$$R_A = \frac{2P_A}{I_{Am}^2} = \frac{2P_\Omega}{I_{Am}^2} + \frac{2P_\Sigma}{I_{Am}^2}, \qquad (47)$$

где P_A — мощность, затрачиваемая в антенне;

I_{Am} — амплитуда тока в пучности стоячей волны в антенне.

На основании выражения (46) можно написать:

$$R_\Omega = \frac{2P_\Omega}{I_{Am}^2} \text{ и } R_\Sigma = \frac{2P_\Sigma}{I_{Am}^2}. \qquad (48)$$

Поскольку антенна является преобразователем энергии, то важнейшей ее характеристикой будет к. п. д., равный отношению излученной мощности ко всей подводимой:

$$\eta_A = \frac{P_\Sigma}{P_\Sigma + P_\Omega}. \qquad (49)$$

На основании выражений (49) и (46) можно записать:

$$\eta_A = \frac{R_\Sigma}{R_\Sigma + R_\Omega} = \frac{1}{1 + \frac{R_\Omega}{R_\Sigma}}. \qquad (50)$$

Отсюда следует, что к. п. д. антенны будет тем большим, чем больше сопротивление излучения по сравнению с сопротивлением тепловых потерь. Однако абсолютное значение сопротивления излучения имеет также существенное значение. Как и во всякой колебательной системе, ток и напряжение при резонансе, а также резонансные свойства антенны существенно зависят от активного сопротивления. Чем оно больше, тем меньше амплитуда тока в антенне при резонансе. Но чем меньше ток, тем меньше и напряжение в антенне. Последнее выгодно, потому что позволяет снизить требования к изоляции антенны.

Чем больше сопротивление излучения, тем шире полоса пропускания антенны и менее резко изменяется ее входное сопротивление при изменении рабочей частоты передатчика. Это облегчает согласование антенны с фидером и генератором при работе в диапазоне частот.

Каким же образом определяют сопротивление излучения и сопротивление потерь? Трудность задачи заключается в том, что оба эти сопротивления имеют активный характер, поэтому при эксперименте у нас нет возможности разделить их друг от друга по тому или иному проявлению и можно определить только полное активное сопротивление антенны. Следовательно, одна из этих величин должна быть определена теоретически.

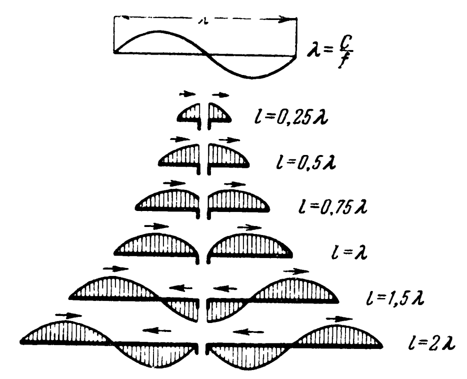
Теоретическое определение потерь энергии в антенне не может дать достаточно точных результатов, так как значительную долю потерь, приходящуюся на утечки через изоляторы, и переходные сопротивления в противовесах и заземлениях учесть и рассчитать не представляется возможным. Поэтому обычно теоретически определяют величину сопротивления излучения.

Трудами советских ученых были разработаны весьма совершенные методы расчета сопротивления излучения основных типов антенных устройств.

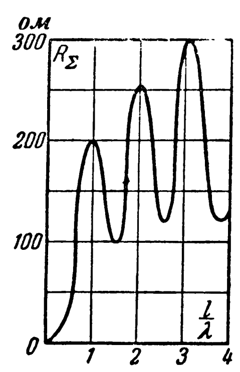
Поскольку энергию излучают движущиеся в проводе антенны электроны, то естественно, что ее излучающие свойства, а следовательно, и сопротивление излучения зависят от характера распределения тока в излучающем проводе.

В случае вынужденных колебаний в антенне частота их определяется источником переменной э. д. с. Поэтому распределение тока и напряжения вдоль антенного провода может быть самым различным. Оно определяется тем, что возбуждаемые источником волны тока и напряжения отра-

жаются от открытого конца антенного провода и образуют стоячие волны аналогично тому, как это происходит в разомкнутой длинной линии. Для того чтобы найти характер распределения тока и напряжения в режиме вынужденных колебаний, нужно по частоте генератора и скорости распространения электромагнитных волн вдоль проводов, используя формулу (1), определить длину возбуждаемой волны. Затем на изображении антенны, выполненном в соответствующем масштабе, построить график стоячих волн, начиная с разомкнутого конца, где будет находиться узел



Фиг. 32. Распределение тока в вибраторах различной длины.



Фиг. 33. Зависимость сопротивления излучения от длины вибратора.

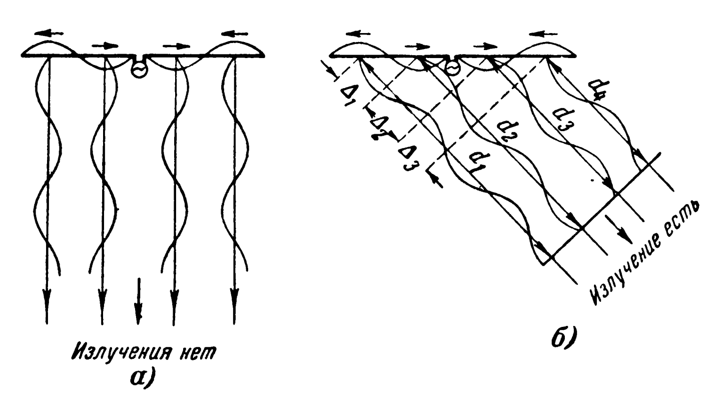
тока и пучность напряжения. На фиг. 32 показан характер распределения тока в вибраторе в зависимости от его длины.

На фиг. 33 приведен график изменения сопротивления излучения симметричного вибратора в зависимости от электрической длины провода.

С изменением длины вибратора от нуля до $l=\lambda$ сопротивление излучения непрерывно возрастает. При длине вибратора $l>\lambda$, когда в каждой его половине укладывается одна целая полуволна и часть следующей, в антенном проводе около его середины проявляются участки, в которых направление токов противоположно направлению токов в крайних участках. Излучение этих участков будет частично ослаблять излучение крайних участков, и сопротивление излучения несколько уменьшится. Однако полной компенсации излучения по всем направлениям не произойдет. Сопротивление излучения начинает снова возрастать

и достигает нового максимума при длине вибратора $l = 2\lambda$, когда казалось бы излучение равных участков с противоположными токами должно полностью уничтожиться.

Рассматривая фиг. 34, легко понять, почему этого не произойдет. Если в достаточно удаленные точки, лежащие на перпендикуляре к оси вибратора (фиг. 34,*а*), волны от участков вибратора с противоположными токами приходят с противоположными фазами и взаимно уничтожаются,



Фиг. 34. Сложение волн, излученных симметричным вибратором по разным направлениям.
d — длина хода волны; Δ — разность хода.

то в точки, расположенные под малыми углами к оси вибратора (фиг. 34,*б*), эти волны придут, имея значительную разность хода.

Поэтому они будут иметь небольшую разность фаз, и в этих направлениях произойдет усиление излучения.

При дальнейшем увеличении длины антенны происходят аналогичные изменения: чередования убывания и возрастания сопротивления излучения, причем величина максимумов и минимумов постепенно нарастает.

Сопротивление излучения зависит только от относительной длины излучателя, а не от его абсолютных размеров. Так, например, все полуволновые диполи обладают сопротивлением излучения $R_\Sigma = 73{,}1$ *ом* независимо от того, равна ли их длина сотням метров или нескольким сантиметрам; все вибраторы длиной в целую волну имеют сопротивление излучения $R_\Sigma = 200$ *ом* и т. д. Сопротивление же тепловых потерь зависит от абсолютных размеров антенны.

Теперь определим, чему равняется входное сопротивление антенны.

Поскольку в антенне устанавливаются стоячие волны тока и напряжения, сдвинутые друг относительно друга на четверть волны, то в общем случае ее входное сопротивление, кроме активной, будет иметь еще некоторую реактивную составляющую.

Поскольку распределение стоячих волн тока и напряжения в антенне в первом приближении будет таким же, как в разомкнутой линии, т. е.

$$I_l = I_{Am} \sin \frac{2\pi l}{\lambda} \quad \text{и} \quad U_l = U_{Am} \cos \frac{2\pi l}{\lambda},$$

то реактивную составляющую входного сопротивления антенны можно подсчитать по формуле

$$X_{A\text{вх}} = -\frac{U_{Am}}{I_{Am}} \operatorname{ctg} \frac{2\pi l}{\lambda} = \rho_A \operatorname{ctg} \frac{2\pi l}{\lambda}. \quad (51)$$

Здесь по аналогии с длинными линиями принимаем, что отношение амплитуд напряжения к току равно волновому сопротивлению антенного провода. Вычисляя волновое сопротивление антенны как входное сопротивление бесконечного провода с бегущей волной, проф. В. Н. Кессених получил формулу для его расчета:

$$\rho_A = 120\left(\ln \frac{\lambda}{2\pi d} - 0{,}57\right), \quad (52)$$

где d — диаметр провода.

Для проводов, используемых обычно в антенной технике, расчеты по этой формуле хорошо согласуются с опытными данными, и величина волнового сопротивления получается близкой к 1 000 *ом*.

Таким образом, реактивную часть входного сопротивления симметричных антенн можно рассчитывать по формуле

$$X_{\text{вх}} = -1\,000 \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} l. \quad (53)$$

Она дает необходимую точность для большинства практических расчетов. Это видно из сравнения экспериментально снятой зависимости входного сопротивления антенны (сплошная кривая на фиг. 35) с теоретической кривой, рассчитанной по формуле длинных линий (пунктирная кривая). Общий характер изменения реактивного сопротивле-

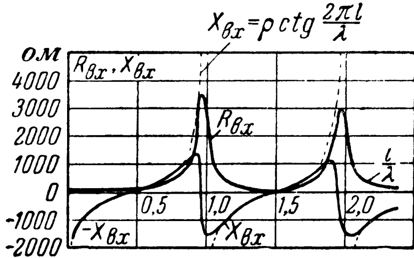
ния в обоих случаях совпадает за исключением узкой области частот вблизи точек параллельного резонанса.

Сравнение этого графика с аналогичными зависимостями, снятыми для реальной линии (фиг. 18), показывают полную родственность явлений в длинной линии и в антенне. Однако следует отметить и ряд новых особенностей:

1. Резонансные характеристики антенн значительно менее острые, чем у длинных линий.

2. Величина активной части входного сопротивления антенны при последовательном резонансе много больше, чем у реальной линии, а при параллельном резонансе много меньше.

3. С увеличением длины антенны максимумы резонансной характеристики сильно убывают и становятся более расплывчатыми.



Фиг. 35. Зависимость активной и реактивной составляющих входного сопротивления от длины вибратора.

4. Точная резонансная длина антенны на несколько процентов меньше целого числа полуволн.

Первые три особенности объясняются тем, что потери в антенне вследствие излучения много больше, чем в обычно неизлучающей линии.

Последняя особенность также объясняется появлением излучения, которое приводит к некоторому изменению распределения стоячих волн в вибраторе по сравнению с линией, благодаря чему на зажимах антенны при длине, равной целому числу полуволн, появляется индуктивная составляющая входного сопротивления, для компенсации которой нужно несколько укоротить вибратор.

Резонансные свойства антенны существенно зависят от диаметра вибратора. С увеличением диаметра уменьшается волновое сопротивление, благодаря чему изменяется и величина входного сопротивления. Поэтому и величина укорочения, необходимого для компенсации реактивной части входного сопротивления, становится другой. Это подтверждается резонансными характеристиками антенн различного диаметра (фиг. 36). Они показывают, что с увеличением диаметра вибратора величина укорочения возрастает. Рас-

чет укорочения производится по формуле, полученной М. А. Леонтовичем и М. Л. Левиным:

$$\Delta l = \frac{0,259}{\lg \frac{\lambda}{2d}} \lambda. \tag{54}$$

В этой формуле Δl — укорочение полуволнового вибратора, а d — диаметр вибратора.

При укорочении нужно сохранять симметрию антенной системы, т. е. укорачивать обе половины диполя на $\frac{\Delta l}{2}$

Для обычных однопроводных антенн укорочение составляет около 5% от длины антенны. Поэтому резонансную длину полуволнового вибратора нужно рассчитывать по формуле

$$l_м = 0{,}95 \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{143}{f_{мггц}}. \tag{55}$$

График фиг. 36 показывает, что чем больше диаметр излучателя, тем шире его полоса пропускания. Это широко используется на практике. Например, для приема телевизионных передач, содержащих широкую полосу частот, используются антенны, выполненные из проводов большого диаметра ($d = 1 \div 3$ *см*).

При расчете антенно-фидерной системы очень важно знать величину входного сопротивления антенны при резонансе. Его можно найти, исходя из энергетических соображений. При резонансе входное сопротивление антенны имеет чисто активный характер. Мощность, затрачиваемая в антенне,

$$P_A = \frac{1}{2} I^2_{Aвх} R_{Aвх}, \tag{56}$$

откуда

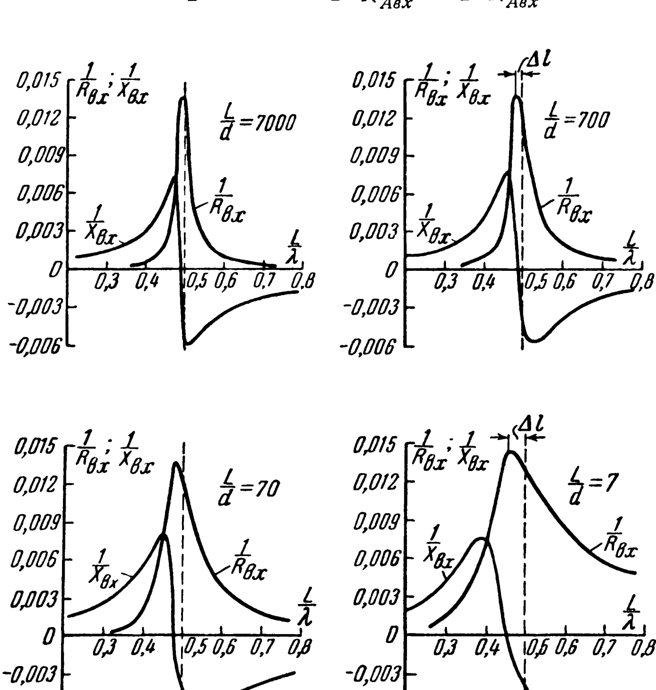
$$R_{Aвх} = \frac{2P_A}{I^2_{Aвх}}. \tag{57}$$

При последовательном резонансе, когда длина диполя равна $0{,}5\lambda$, $1{,}5\lambda$, $2{,}5\lambda$ и т. д. антенна питается в пучности тока. Следовательно, $I_{Aвх} = I_{Am}$ и согласно выражению (47)

$$R_{Aвх} = R_\Sigma + R_\Omega. \tag{58}$$

При резонансе токов, когда длина диполя равна λ, 2λ, 3λ и т. д., питание антенны производится в пучности напряжения, и поглощенная мощность

$$P_A = \frac{1}{2} I_{Am}^2 R_A = \frac{1}{2} \frac{U_{A вх}^2}{R_{A вх}} = \frac{1}{2} \frac{U_{Am}^2}{R_{A вх}},$$



Фиг. 36. Резонансные характеристики вибраторов различной толщины.

откуда

$$R_{A вх} = \left(\frac{U_{Am}}{I_{Am}}\right)^2 \frac{1}{R_A};$$

поскольку же отношение амплитуд напряжения к току равно волновому сопротивлению антенны, то

$$R_{A вх} = \frac{\rho_A^2}{R_A}. \tag{59}$$

Рассмотрим два числовых примера.

1. Мощность, подводимая к настроенной симметричной полуволновой антенне, $P_A = 10$ *вт*. Нужно определить ток и напряжение в антенне и ее входное сопротивление.

Поскольку питание полуволнового вибратора осуществляется в пучности тока, то имеет место резонанс напряжений, и входное сопротивление антенны равно сопротивлению потерь в антенне. Если пренебречь тепловыми потерями, то входное сопротивление равно сопротивлению излучения R_Σ, которое по графику фиг. 33 для полуволновой антенны равно 73,1 *ом*. Амплитуда тока на входе антенны

$$I_{вх} = I_m = \sqrt{\frac{2P}{R_\Sigma}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10}{73,1}} \approx 0,5\ a.$$

Амплитуда напряжения на входе антенны

$$U_{вх} = I_{вх} R_{вх} = I_m R_\Sigma = 0,5 \cdot 73,1 \approx 37\ в.$$

Амплитуда напряжения в пучности (на концах вибратора) равна произведению амплитуды тока в пучности на волновое сопротивление антенны, которое для обычных проволочных антенн можно принять равным 1 000 *ом*

$$U_m = I_m \rho = 0,5 \cdot 1\,000 = 500\ в.$$

2. Найти те же величины, если та же мощность подводится к симметричной антенне длиной в одну волну ($l = \lambda$). В этом случае питание антенны осуществляется в точках, где образуются узел тока и пучность напряжения. При этом будет иметь место резонанс токов. По графику фиг. 33 находим, что сопротивление излучения R_Σ антенны длиной в одну волну равно 200 *ом*. Используя формулу (59), находим входное сопротивление антенны:

$$R_{вх} = \frac{\rho^2}{R_\Sigma} = \frac{(1\,000)^2}{200} = 5\,000\ ом.$$

Найдем потребляемый ток:

$$I_{вх} = \sqrt{\frac{2P}{R_{вх}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10}{5\,000}} \approx 0,06\ a.$$

Амплитуда напряжения на входе антенны

$$U_{вх} = I_{вх} \cdot R_{вх} = 0,06 \cdot 5\,000 = 300\ в.$$

Амплитуда тока в пучности

$$I_m = \frac{U_m}{\rho_A} = \frac{300}{1\,000} = 0,3\ a.$$

Из приведенных примеров видно, что условия питания антенны в пучности тока и в пучности напряжения резко отличаются друг от друга. В первом случае антенна представляет собой активную нагрузку сопротивлением в несколько десятков ом и потребляет сравнительно большой ток, амплитуда же напряжения на входе незначительна. Во втором случае, наоборот, антенна имеет очень большое входное сопротивление (порядка нескольких тысяч ом) и потребляет очень неболь-

шой ток; амплитуда напряжения на входе относительно высока. Поэтому часто говорят, что в первом случае антенна питается током, а во втором случае антенна питается напряжением.

Если передатчик работает в плавном диапазоне частот, то неизбежно приходится иметь дело с расстроенной антенной. С помощью органов настройки компенсируют реактивную составляющую входного сопротивления антенны. Оставшуюся активную составляющую можно подсчитать, исходя из следующих соображений.

Мощность, поглощаемая антенной,

$$P_A = \frac{1}{2} I^2_{Aвх} \cdot R_{вх}.$$

Амплитуда тока на входе антенны определяется из уравнения стоячей волны тока

$$I_{Aвх} = I_{Am} \sin \frac{2\pi l}{\lambda}.$$

Следовательно,

$$R_{вх} = \frac{2P_A}{I_{Am} \sin^2 \frac{2\pi l}{\lambda}}.$$

Сравнивая это выражение с формулой для вычисления сопротивления излучения (47), находим, что

$$R_{вх} = \frac{R_\Sigma}{\sin^2 \frac{2\pi l}{\lambda}}. \qquad (60)$$

Формула (60) справедлива для антенн любой длины за исключением узкой области вблизи параллельного резонанса, когда точки питания попадают в узел тока. В этом случае нужно пользоваться формулой (59).

При одной и той же величине тока в пучности антенны различной формы и размеров излучают неодинаковое количество энергии. Для того чтобы легче можно было сравнивать между собой различные антенны, вводят еще один параметр: так называемую *действующую высоту антенны.* Как уже говорилось ранее, количество энергии, излучаемое антенной, определяется количеством электрических зарядов, совершающих колебания в проводе антенны. Подсчитать их можно графически, построив на антенном проводе в определенном масштабе график распределения тока

(фиг. 37,*а*). Разбив полученный график на небольшие участки (на протяжении которых величину тока можно считать неизменной), умножаем их длину на величину тока и, просуммировав, определяем площадь $S_{\text{т1}}$ участка, ограниченного кривой тока и проводом антенны. Сокращенно эту площадь называют *площадью тока антенны.*

Антенны с одинаковой площадью тока излучают одинаковое количество энергии, так как в них перемещается одинаковое количество зарядов. Поэтому удобно характеризовать излучение антенны, сравнивая ее с некоторой прямолинейной антенной, имеющей ту же площадь тока при равномерном распределении его по проводу (фиг. 37,*б*). Величина его берется равной току в пучности стоячей волны тока реальной антенны. Длину такой воображаемой антенны называют *действующей или эффективной длиной реальной антенны.* Это понятие было введено еще на первом «длинноволновом» этапе развития радиотехники, когда по преимуществу использовались вертикальные антенны. Поэтому данный параметр чаще называют действующей высотой, а не длиной антенны.

Фиг. 37. Нахождение действующей высоты антенны.
а—распределение тока в антенне *б* — мнимая антенна с равномерным распределением тока и той же площадью тока.

Чем равномернее распределение тока по антенному проводу, тем ближе действующая высота антенны к герметической и тем лучше используется излучающий провод.

Действующая высота полуволнового вибратора

$$h_д = 0{,}64 h_г,$$

где $h_г$ — геометрическая длина вибратора.

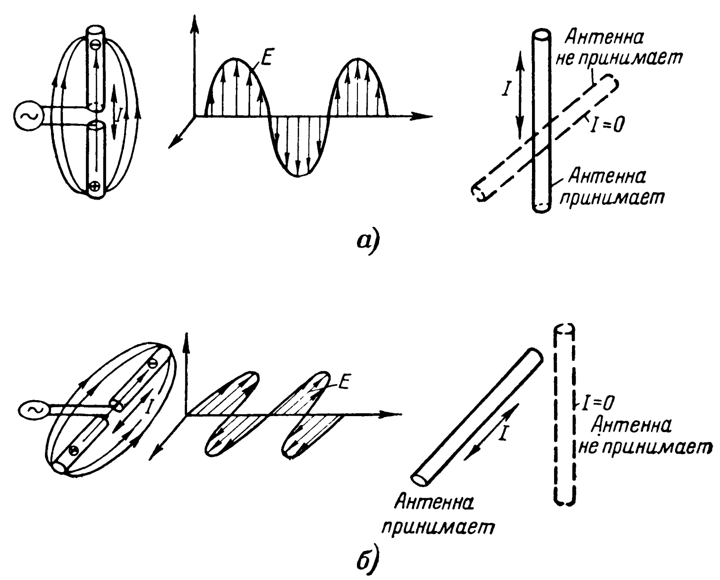
Введение этого понятия позволяет получить общую для всех типов антенн зависимость напряженности электрического поля, создаваемого в некоторой точке пространства, от величины тока, действующей высоты и расстояния до данной точки. Напряженность поля, создаваемая антенной, пропорциональна площади тока, т. е. произведению величины тока на действующую высоту. С увеличением расстояния от антенны напряженность поля, так же как и у ста-

тических зарядов, согласно закону Кулона убывает обратно пропорционально расстоянию

$$E = A\frac{I_{Am}h_{д}}{r}, \tag{62}$$

где A — коэффициент пропорциональности, зависящий от условий распространения электромагнитных волн и ориентировки антенны по отношению к направлению на данную точку.

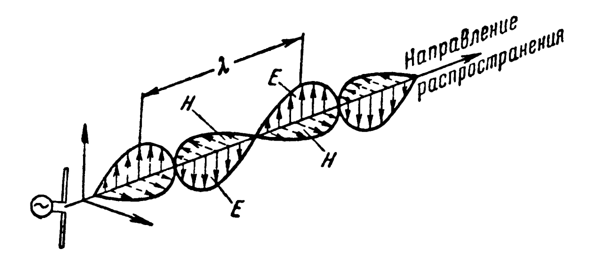
Теперь рассмотрим поле излучения диполя.



Фиг. 38. Поляризация волн линейного излучателя.
а — вертикальная поляризация; *б* — горизонтальная поляризация.

Электрическое поле графически можно охарактеризовать векторами, величина и направление которых будут в некотором масштабе представлять величину и направление электрических сил, действующих в различных точках пространства. Естественно, что перемещение электронов по проводу прямолинейной антенны вызывает перемещение пробных электрических зарядов, помещенных в окружающее пространство, также в данном направлении, т. е. все векторы электрического поля прямолинейной антенны лежат в плоскости, проходящей через вибратор (фиг. 38). Такое поле принято называть *поляризованным*.

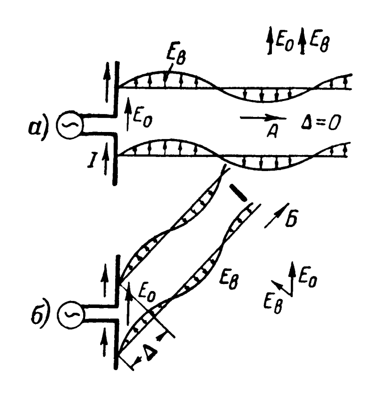
Вопрос о поляризации имеет в радиотехнике весьма существенное значение. Так, например, если в поле горизонтально поляризованных волн поместить вертикальную приемную антенну, то никаких токов в ней не наведется (фиг. 38,*б*). Чем ближе направление оси приемной антенны



Фиг. 39. Векторное изображение электромагнитного поля прямолинейного вибратора.

к направлению поляризации, тем больше будет эффект воздействия на нее падающей волны.

Направление магнитного поля электромагнитной волны перпендикулярно направлению электрического поля. На фиг. 39 изображено распределение электрического и магнитного полей в пространстве, создаваемое в некоторый момент времени электромагнитной волной. Электромагнитные волны являются волнами поперечного типа: векторы электрического и магнитного полей перпендикулярны направлению распространения волн.



Фиг. 40. Излучение диполя по различным направлениям.

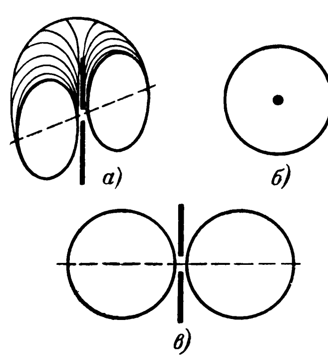
Напряженность поля, излучаемого линейным симметричным вибратором, в данной точке пространства определяется двумя факторами: поляризацией излучения вибратора и наложением волн, излученных различными участками вибратора.

Рассмотрим влияние этих факторов на примере симметричного полуволнового диполя.

Электрические поля волн, излучаемых в направлении *A* (фиг. 40,*а*), обладают максимальной интенсивностью, по-

скольку они совпадают по направлению с первичным (внутренним) полем вибратора. Кроме того, синфазные токи, текущие в обеих половинах диполя, создают синфазные волны, которые усиливают друг друга. Поэтому излучение в направлении *А* максимально и приблизительно равно арифметической сумме волн, излученных отдельными участками вибратора в этом направлении.

Электрические волны, излучаемые в направлении *Б* (фиг. 40,*б*), значительно слабее, поскольку электрическое поле волны (перпендикулярное направлению распространения) в этом случае представляет лишь некоторую составляющую первичного поля вибратора. По этой же причине вибратор ничего не излучает в направлении своей оси, так как составляющая поля, перпендикулярная направлению оси вибратора, равна нулю.



Фиг. 41. Диаграммы направленности полуволнового вибратора.
а — пространственное изображение, *б* — в горизонтальной плоскости, *в* — в вертикальной плоскости.

С другой стороны, волны, излученные синфазными токами различных участков вибратора, приобретают значительную разность хода при распространении в направлении *Б*. Поэтому в зависимости от того, насколько направление *Б* отличается от направления *А*, они будут либо усиливать, либо ослаблять друг друга.

Благодаря этим двум обстоятельствам диаграмма излучения полуволнового вибратора, характеризующая в относительных единицах интенсивность излучения по различным направлениям, имеет максимум в направлении, перпендикулярном оси вибратора. С уменьшением угла интенсивность излучения падает до нуля в направлении оси вибратора (фиг. 41).

В плоскости, перпендикулярной оси диполя, вследствие симметрии антенны излучение по всем направлениям одинаково, и диаграмма направленности имеет вид окружности (фиг. 41,*б*).

Полярные диаграммы направленности, изображенные на фиг. 41, дают достаточно полное представление об интенсивности излучения полуволновой антенны по различным направлениям в пространстве.

Направленность излучения вовсе не является пороком антенных устройств. За редким исключением абсолютно ненаправленное излучение не только не желательно, но и невыгодно, так как всегда существуют направления, по которым излучать энергию не имеет смысла, и, наоборот, есть направления, по которым желательно создавать максимально интенсивное излучение. Поэтому часто конструируют специальные антенные системы, обладающие ярко выраженными направленными свойствами.

Из всего сказанного можно сделать вывод, что в общем случае, чем большей направленностью обладает антенна, тем больше будут ее размеры. Ибо при этом большее число ее элементов в определенных направлениях будет усиливать излучение, а в других ослаблять его, создавая острые максимумы и минимумы в диаграмме направленности.

Как же оценивать направленные свойства антенны? Предположим, что приемник принимает сигналы от передатчика, работающего с абсолютно ненаправленной антенной, излучающей энергию равномерно по всем направлениям. Если затем заменить ее на направленную антенну и направить максимум излучения в сторону приемника, то громкость приема возрастет. Таким образом, замена ненаправленной системы на направленную эквивалентна увеличению мощности передатчика. Число, которое показывает, во сколько раз можно уменьшить мощность передатчика при переходе с ненаправленной антенны к направленной, сохраняя неизменной силу сигнала в направлении главного излучения, принято называть *выигрышем антенны.*

Например, полуволновый диполь обладает выигрышем $G = 1{,}64$.

Поскольку абсолютно ненаправленных антенн не существует, то более реальную оценку выигрыша можно получить, сравнением направленности различных антенн с некоторой наиболее часто употребляемой слабо направленной антенной. Такой эталонной антенной обычно считают полуволновый симметричный диполь. В дальнейшем мы и будем определять выигрыш антенн по отношению к нему. Этот выигрыш, как и всякое усиление или ослабление, принято выражать в децибелах.

До сих пор мы рассматривали антенну изолированно от внешних факторов, которые могли бы оказать влияние на ее излучающие свойства. На самом деле антенна работает,

как правило, вблизи поверхности земли, которая существенным образом влияет как на излучающую способность антенны, так и на ее диаграмму направленности.

13. Влияние земли на излучение антенн

Многочисленные измерения электрических свойств различных почв, входящих в состав земной поверхности, проделанные радиофизиками, приводят к следующим основным выводам.

1. Проводящие свойства различных почв в сильной степени зависят от рода почвы, ее структуры и состояния.

2. Проводящие свойства почвы в значительных пределах изменяются в зависимости от того, на какой частоте производится измерение.

В табл. 1 приведены пределы изменения проводимости основных почв.

Таблица 1

Вид поверхности	Проводимость, CGSM
Морская вода . .	10^{-11}—10^{-12}
Пресная вода . .	10^{-12}—$5 \cdot 10^{-12}$
Чернозем, глина, суглинок . . .	10^{-13}—$5 \cdot 10^{-13}$
Горные породы, кварцит, известняк, песчаник .	$5 \cdot 10^{-13}$—10^{-14}

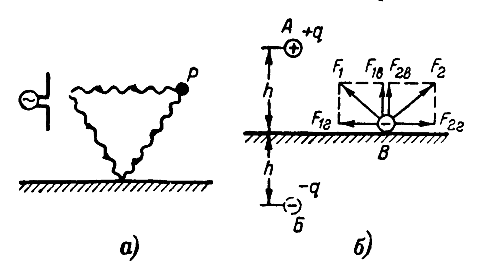
Как правило, влажные и сырые почвы обладают значительно большей проводимостью, чем сухие почвы того же состава. Наличие минеральных солей также способствует улучшению проводящих свойств почвы.

При прохождении переменных электрических токов по земле имеет место явление, аналогичное поверхностному эффекту в обычных проводах: сопротивление возрастает с увеличением частоты. Поэтому с укорочением длины волны, проводящие свойства почвы, как правило, ухудшаются и она в конце концов начинает вести себя не как проводник, а как диэлектрик.

Вследствие различия проводящих свойств различных почв различным будет и диапазон частот, в котором их можно считать проводником, полупроводником или диэлектриком. Так, например, воду можно считать проводником во всем диапазоне радиоволн вплоть до волн метрового диапазона. Сырая почва может рассматриваться как проводник только на волнах длиннее 100 *м*. На коротких волнах она ведет себя, как полупроводник, а на ультракоротких волнах, как диэлектрик. Каменистые горные породы, сухой известняк и сухой песок во всем диапазоне радиоволн ведут себя, как диэлектрик.

Электромагнитные волны, излученные антенной, находящейся над идеально проводящей поверхностью (фиг. 42,*а*), приходят в некоторую произвольную точку пространства *P* двумя различными путями: непосредственно от самой антенны и, отразившись, от поверхности проводника.

Для того чтобы найти результирующее поле, в точке *P* после сложения прямой и отраженной волны удобно пользоваться представлением о «зеркальном изображении антенны». Происхождение «зеркального изображения» можно пояснить следующим образом. Если над идеально проводящей поверхностью на высоте h появится какой-либо заряд, то вследствие электростатического притяжения на ней произойдет некоторое перераспределение свободных зарядов. В результате этого электрическое поле на поверхности станет таким, каким оно было бы, если бы вместо нее внизу на расстоянии h был помещен заряд, равный по величине и противоположный по знаку заряду над поверхностью проводника. При этом электрическое поле в окружающем пространстве, определяемое полем первичного заряда и полем зарядов на поверхности проводника, будет везде таким, каким оно было бы при наличии только этой пары противоположных зарядов. Второй, мнимый заряд и называется зеркальным изображением первого.



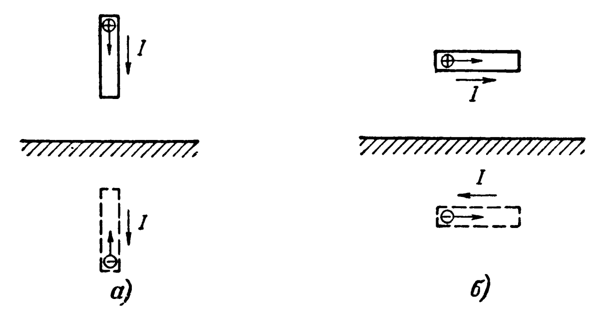
Фиг. 42. Излучение антенны над идеально проводящей поверхностью.

а — прямая и отраженная волна антенны; *б* — действие заряда и его зеркальное изображение.

Докажем справедливость высказанного положения. Распределение зарядов на поверхности проводника при появлении над ней заряда $+q$ (фиг. 42,*б*) установится таким, что горизонтальная составляющая электрического поля будет равна нулю. Действительно, если это не будет соблюдено, то под действием ее по поверхности потечет электрический ток. Но ясно, что покоящийся заряд не может вызвать прохождение тока в проводнике. Легко видеть, что то же самое будет иметь место на данной поверхности, если металл убрать и поместить в симметричную точку *Б* «зеркальный заряд». При этом поле в произвольной точке поверхности *B* будет определяться векторами F_1 и F_2 полей зарядов

$+q$ и $-q$. Поскольку заряды удалены от точки B на одинаковые расстояния, то величины векторов F_1 и F_2 будут равны. Горизонтальные составляющие этих векторов уничтожают друг друга, а вертикальные складываются. Это и доказывает справедливость замены действия проводящей поверхности действием «зеркального заряда».

Если заряд, помещенный над идеально проводящей поверхностью, начнет двигаться по вертикали вниз, то его зеркальное изображение (противоположный по знаку заряд) будет перемещаться также к поверхности, чтобы сохранялось условие равенства расстояний до нее. Поскольку дви-



Фиг. 43. Токи в зеркальном изображении антенны.
а — при вертикальном расположении антенны; *б* — при горизонтальном расположении антенны.

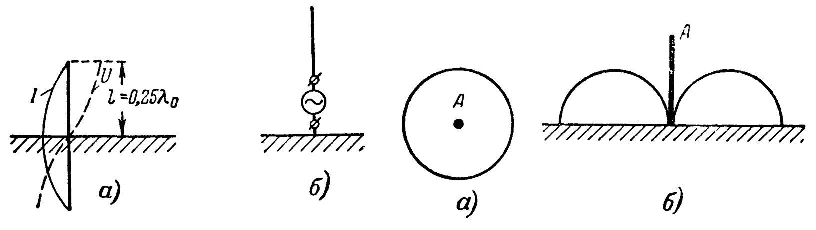
жение зарядов есть не что иное, как электрический ток, то, поместив над поверхностью вертикальную антенну, в которой в данный момент времени ток течет сверху вниз, мы вызовем в ее зеркальном изображении прохождение тока того же направления (фиг. 43,*а*). Поэтому, если над идеально проводящей поверхностью поместить вертикальную антенну, то ее поле определится, как поле антенны и ее зеркального изображения, в котором течет ток той же величины и того же направления. Таким образом, вертикальная антенна и ее зеркальное изображение образуют систему двух синфазных вибраторов.

Если же заряд, поднятый над идеально проводящей землей, будет двигаться в горизонтальном направлении, например, слева направо (фиг. 43,*б*), то противоположный по знаку зеркальный заряд будет передвигаться в том же направлении. Значит, если в горизонтальной антенне течет ток в одном направлении, то в зеркальном изображении ток течет в противоположном направлении. Такие два излучателя называются *противофазными вибраторами.*

Из сказанного можно сделать вывод, что наличие хорошо проводящей земли под излучателем существенно изменяет его свойства. Влияние земли в этом случае равносильно появлению второго излучателя, ток в котором имеет либо то же направление, что и в реальном излучателе (в случае вертикальной антенны), либо противоположное направление (в случае горизонтального излучателя).

14. Несимметричный заземленный вибратор

Если вертикальную антенну расположить так, чтобы ее нижний конец касался поверхности земли, она образует вместе со своим зеркальным изображением замкнутый симметричный вибратор (фиг. 44), резонансная волна которого в 2 раза длиннее его геометрической высоты. Следовательно,



Фиг. 44. Четвертьволновый несимметричный вибратор.
а — распределение тока и напряжения; *б* — подключение генератора.

Фиг. 45. Диаграмма направленности вертикального четвертьволнового вибратора.
а — в горизонтальной плоскости; *б* — в вертикальной плоскости.

резонансная волна данной антенны в 4 раза больше высоты ее реальной надземной части. Поэтому заземленную антенну, являющуюся основным представителем класса несимметричных антенн, называют часто *четвертьволновым вибратором.*

Эта антенна была предложена великим русским ученым А. С. Поповым в 1895 г. С тех пор и до настоящего времени наряду с симметричным вибратором она является одним из основных, наиболее распространенных антенных устройств. Достоинством заземленного вибратора является его малая резонансная длина и простота устройства. Это особенно удобно при работе на относительно длинных волнах.

Поскольку вместе с зеркальным изображением заземленный вибратор образует симметричный диполь, то и поле излучения его над поверхностью земли совершенно аналогично полю полуволнового вибратора (фиг. 45), нижняя половина характеристики которого срезана землей.

Вследствие того, что распределение тока и напряжения вдоль несимметричного заземленного вибратора такое же, как и у симметричного, характер изменения его реактивного и активного сопротивлений остается тем же, а все расчетные формулы, выведенные для симметричной антенны, справедливы и для несимметричного излучателя. Единственная разница заключается в том, что потенциал второго зажима генератора, соединенного с землей, в любой момент времени равен нулю. Поэтому разность потенциалов на зажимах несимметричной антенны всегда вдвое меньше, чем в симметричной антенне. Это приводит к тому, что входное сопротивление несимметричного вибратора оказывается вдвое меньшим, чем у симметричного.

Следовательно, и сопротивление излучения четвертьволнового несимметричного вибратора равно половине сопротивления излучения полуволнового диполя, т. е.

$$R_{\Sigma} \approx 37 \text{ ом}.$$

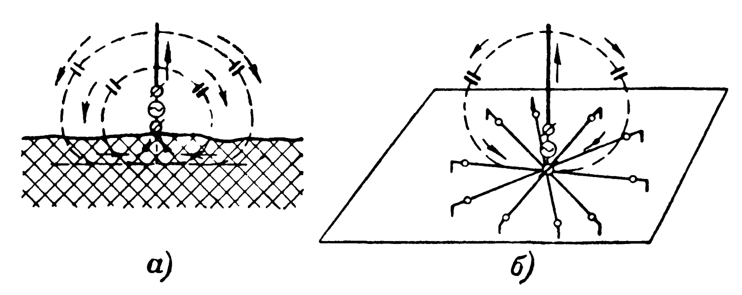
По той же причине волновое сопротивление несимметричных антенн можно считать равным половине волнового сопротивления симметричных антенн, т. е. 500 *ом*.

Все приведенное выше рассмотрение справедливо только в том случае, когда земля представляет собой хороший проводник. Однако далеко не всегда это имеет место. Когда земля обладает плохими проводящими свойствами, характер распределения тока в земной поверхности не соответствует рассмотренному выше, в результате чего поле излучения вибратора изменяется. Но еще более существенно это влияет на энергетику системы. Увеличение активного сопротивления земли приводит к возрастанию потерь во всей излучающей системе, состоящей из вибратора и земли, уменьшению амплитуды тока, уменьшению излучаемой мощности и падению к. п. д. антенны.

Особенно большое значение имеет сопротивление зоны вблизи основания антенны, куда стекаются все токи, идущие в земле (фиг. 46,*а*). Поэтому для улучшения проводимости этого участка применяют металлизацию земли: закапывают в землю металлические листы, провода, улучшают химический состав почвы, пропитывая ее различными солями, или используют противовесы. Теоретические расчеты показывают, что наибольшие потери имеют место в зоне с радиусом приблизительно в $0{,}35\lambda$. Поэтому металлизацию земли осуществляют в радиусе порядка полуволны вокруг основания антенны.

Опыт показывает, что нет надобности выполнять заземление в виде сплошного металлического листа; достаточно хорошо работает система радиально расходящихся проводов диаметром 2—3 *мм*, закопанных в землю на глубину 20—50 *см*. Увеличение общего числа проводов улучшает качество заземления, однако увеличение их числа свыше 100—120 не дает уже существенного эффекта. Качество заземления улучшается, если радиальные провода соединяются между собой перемычками.

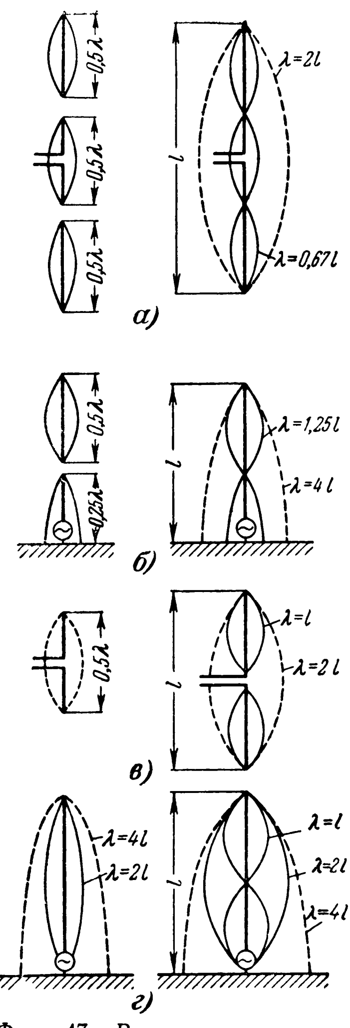
Часто заземление заменяют системой проводов, не зарытых, а поднятых над землей, называемых *противовесом*. Противовес должен достаточно хорошо экранировать антенный провод от земли, перехватывая основную массу силовых линий, идущих от него (фиг. 46,*б*). Противовес обычно дает худшие результаты, чем заземление, но в ряде случаев его применение оказывается технически более целесообразным, чем устройство заземления (например, в передвижных радиостанциях, при установке станции на каменистом грунте и т. д.).



Фиг. 46. Путь тока заземленного (*а*) вибратора и вибратора с противовесом (*б*).

15. Резонансные частоты антенн. Гармониковые антенны

Рассматривая резонансные характеристики симметричной антенны (фиг. 35), можно убедиться в том, что одна и та же антенна обладает бесконечным множеством резонансных частот. На самом деле, существование резонанса определяется только величиной отношения l/λ. Поэтому, оставляя неизменной длину антенны l и изменяя длину волны, можно получить резонансные явления в ней всякий раз, когда вдоль ее длины будет укладываться целое число полуволн (фиг. 35). При этом наибольшей резонансной



Фиг. 47. Высшие гармоники симметричных и несимметричных антенн.

а и *б* — нечетные гармоники, *в* и *г* — четные гармоники.

волной будет та, половина которой уложится в антенне. Эту волну принято называть *основной резонансной волной антенны*. Более короткие волны, для которых антенна также представляет резонансную систему, называют *высшими гармониками антенны*. При этом им приписывают номер по числу полуволн, которые укладываются вдоль провода антенны.

Каким же образом объяснить существование этих высших гармоник, для которых антенна представляет собой резонансную систему? И какое практическое значение это имеет?

Если к полуволновой антенне присоединить с обоих концов (так, чтобы не нарушать ее симметрии) еще по одной полуволновой антенне (фиг. 47,*а*), то это не изменит режима ее работы, поскольку на концах существуют узлы тока, и их входное сопротивление близко к бесконечности. Во всех трех частях вновь образовавшейся антенны условия резонанса не нарушатся, следовательно, и вся система в целом будет резонансной. Важно заметить, что при этом характер резонанса не изменится: в месте подключения источника питания попрежнему будет находиться пучность тока.

Совершенно аналогично можно убедиться в существовании нечетных гармоник у несимметричных антенн (фиг. 47,*б*).

Нетрудно убедиться в существовании и четных гармоник. Если удлинить половины симметричного полуволно-

вого вибратора на четверть волны (фиг. 47,*в*), то образуется симметричный диполь, каждая из половин которого будет представлять собой полуволновый резонансный вибратор. Поэтому вся антенна в целом также будет резонансной. Но, кроме того, она будет резонансной и для волны, половина которой уложится вдоль ее длины. Или обратно, симметричный вибратор будет представлять собой резонансную систему, помимо основной волны, также для волны, вдвое более короткой.

Прибавляя затем с обеих сторон еще по полуволновому вибратору, можно убедиться, что образуется резонансная система для четвертой гармоники, и т. д. То же самое будет иметь место и у несимметричных антенн (фиг. 47,*г*).

Из сказанного можно сделать следующие выводы:

1. Симметричные антенны представляют собой резонансные системы и хорошо излучают все волны, целое число полуволн которых укладывается вдоль их длины. Наиболее длинной резонансной волной будет та, половина которой равна длине вибратора. Эта волна называется основной резонансной волной антенны.

2. Несимметричные антенны резонансны и хорошо излучают все волны, целое число четвертей которых укладывается вдоль их длины. Основной резонансной волной будет та, четверть длины которой равна длине антенны.

3. На всех нечетных гармониках точки питания располагаются в пучности тока (фиг. 47,*а* и *б*). В антенне имеет место резонанс напряжения, и ее входное сопротивление невелико и равно сопротивлению потерь в цепи антенны.

4. На всех четных гармониках (фиг. 47,*в* и *г*) точки, к которым подводится питание, оказываются расположенными в узле тока. В антенне имеет место резонанс токов и ее входное сопротивление достигает весьма значительной величины.

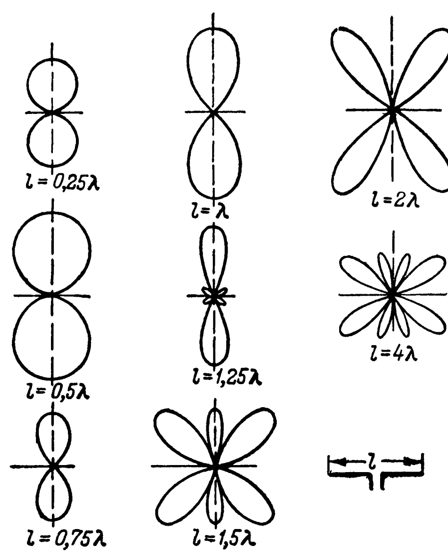
5. При переходе с одной нечетной гармоники на другую или с одной четной на другую четную входное сопротивление антенны меняется сравнительно мало. При переходе же с четной гармоники на нечетную или наоборот входное сопротивление антенны изменяется очень сильно.

Это свойство позволяет эффективно без перестройки использовать антенны для работы на нескольких фиксированных волнах, отличающихся по длине друг от друга в целое число раз. Антенны, работающие на высших гармониках, получили название *гармониковых*. Для того чтобы при переходе с одной волны на другую изменение входного

сопротивления было минимальным и условия согласования с фидером сильно не нарушались, нужно использовать только либо четные, либо нечетные гармоники.

Существование многих резонансов у антенны приводит к тому, что высшие гармоники анодного тока выходного каскада передатчика могут создать интенсивное излучение, если попадут в цепь антенны. Поэтому приходится принимать специальные меры для того, чтобы их отфильтровать.

На фиг. 48 приведены характеристики направленности горизонтальных симметричных антенн различной относительной длины. Для того чтобы получить диаграмму направленности несимметричных заземленных вибраторов вдвое меньшей высоты, нужно повернуть всю картину на 90° и отрезать нижнюю половину по пунктирной линии.



Фиг. 48. Диаграммы направленности антенн различной электрической длины.

Характеристика излучения резко меняется при изменении электрической длины вибратора. Это объясняется изменением распределения тока в вибраторе при переходе с одной волны на другую или при увеличении длины антенны. Все диаграммы построены для антенн, находящихся в свободном пространстве. Поэтому они выражают зависимость излучающих свойств антенны по различным направлениям в любой плоскости, проходящей через ее ось.

Рассматривая эти характеристики, можно заметить общую закономерность их изменения.

При длине излучателя менее 0,5 λ максимум излучения направлен перпендикулярно оси вибратора, и общий вид диаграммы направленности мало зависит от его длины.

Увеличение длины вибратора более 0,5 λ приводит к усилению излучения в направлении, перпендикулярном оси.

Вплоть до $l = \lambda$ вибратор имеет диаграмму в виде одного лепестка. При дальнейшем увеличении длины вибратора появляются симметричные боковые лепестки. Постепенно они растут, в то время как излучение по перпендикулярному направлению уменьшается. Когда длина вибратора станет равной 2λ, излучение в перпендикулярном направлении совершенно прекращается. Одновременно боковые лепестки достигнут максимума и будут направлены под углом 45° к оси вибратора.

При работе на третьей гармонике снова возникает излучение в перпендикулярном направлении, но боковые лепестки становятся более острыми и располагаются под меньшими углами к оси вибратора.

На четвертой гармонике излучение в перпендикулярном направлении опять исчезает и появляются два новых лепестка и т. д.

Таким образом, с увеличением номера гармоники диаграмма направленности приобретает все более и более сложное многолепестковое строение, причем число лепестков равно номеру гармоники. При работе на четных гармониках излучение в направлении, перпендикулярном оси вибратора, отсутствует. Среди лепестков диаграммы направленности два, располагающиеся ближе всего к оси вибратора, обладают наибольшей интенсивностью. Чем больше номер гармоники, тем более ярко выражено преобладание этих лепестков над другими. С увеличением номера гармоники острота главных лепестков будет выражена более сильно. Направленные свойства антенны будут лучше. Чем выше номер гармоники, тем ближе главные максимумы диаграммы направленности располагаются к оси вибратора.

16. Синфазные и противофазные антенные системы. Рефлекторы и директоры

Для получения направленного излучения в технике коротких и ультракоротких радиоволн часто используют системы излучателей, определенным образом расположенных друг относительно друга. Обычно излучатели возбуждаются так, что токи в них находятся либо в фазе, либо в противофазе. В зависимости от этого систему называют *синфазной* или *противофазной*. Впервые такие антенные системы были разработаны в СССР проф. М. А. Бонч-Бруевичем и В. В. Татариновым.

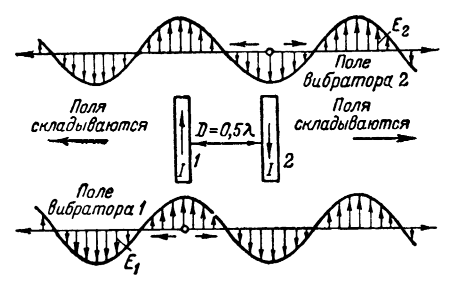
Рассмотрим сначала работу противофазных антенн.

Если провода, несущие противофазные токи, разнести на некоторое расстояние так, чтобы оно стало соизмеримым с длиной волны, то система станет излучающей. В этом нетрудно убедиться.

Каждый из проводов (фиг. 49) излучает во все стороны электромагнитные волны, начальные фазы которых определяются фазами протекающих в них токов. Волна, излученная первым проводом, двигающаяся направо, достигнет второго провода через отрезок времени

$$t = \frac{D}{c}.$$

Пусть расстояние D между проводами равно половине длины волны, тогда волна подойдет ко второму проводу через полпериода, после того как она была излучена первым проводом. Если при этом ее фаза была максимальной положительной, то в тот же начальный момент времени второй провод излучал волну с максимальной отрицательной фазой. Через полпериода, когда первая волна, имеющая максимально положительную фазу, подойдет ко второму проводу, ток в нем изменит фазу на противоположную и также будет излучать волну с максимальной положительной фазой. При этом произойдет сложение и усиление обеих волн, двигающихся в направлении от одного провода к другому. Вполне очевидно, что то же самое будет происходить в противоположном направлении.



Фиг. 49. Сложение волн двух противофазных излучателей.

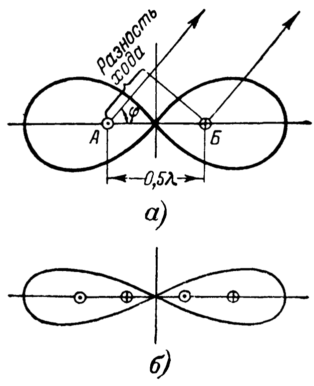
В других направлениях (фиг. 50) разность хода между обеими излученными волнами меньше, поскольку ее величина всегда меньше отрезка *АБ*. Поэтому по этим направлениям эффект усиления выражен слабее, а начиная с угла $\varphi = 45°$ к оси системы, начинается частичное взаимное уничтожение обеих волн. В направлении, перпендикулярном главному, разность хода становится равной нулю и обе волны взаимно уничтожаются.

На фиг. 50,*а* приведена результирующая характеристика излучения такой противофазной системы в плоскости,

перпендикулярной оси проводов. Диаграмма направленности в плоскости, проходящей через ось проводов, зависит от того, является ли каждый из проводов симметричным или несимметричным излучателем, и от его электрической длины.

Если к данной системе присоединить еще одну пару противофазных излучателей и расположить ее на расстоянии 0,5 λ от первой (фиг. 50,*б*), то она будет создавать дополнительное усиление излучения в том же направлении, что и первая пара.

При достаточно большом числе противофазных излучателей можно получить очень острую диаграмму направленности, максимум которой будет направлен вдоль продольной оси антенной системы. Такие антенны относятся к классу продольных излучателей.



Фиг. 50. Характеристики излучения противофазных антенн в плоскости, перпендикулярной оси проводов.

а — характеристика двух излучателей; *б* — характеристика четырех излучателей.

Следует заметить, что расстояние в полволны между противофазными излучателями вовсе не является обязательным. Противофазные антенны с уменьшенным расстоянием между вибраторами обладают значительно большей направленностью, чем рассмотренная выше система.

Причину увеличения направленности при уменьшении расстояния между вибраторами ($D < 0,5\ \lambda$) нетрудно понять, рассмотрев диаграмму направленности антенны при расстоянии между вибраторами $D = 0,5\ \lambda$, приведенную на фиг. 50,*а*. Она показывает, что в направлениях, близких к главному, когда разность хода волн, излученных обоими вибраторами, невелика, результирующий сигнал уменьшается сравнительно мало. В направлениях же, далеких от главного, где разность хода получается большой, небольшое изменение направления приводит к резкому изменению силы сигнала. У антенн с укороченными расстояниями между вибраторами уже по главному направлению имеется значительная разность хода. Поэтому даже небольшое отклонение от него приводит к резкому уменьшению интенсивности излучения, и диаграмма направленности оказывается много острее, чем у противофазных антенн, у которых $D = 0,5\ \lambda$.

Чем меньше расстояние между вибраторами, тем выше направленность антенной системы. Но одновременно сильно уменьшается сопротивление излучения антенны. Поэтому обычно расстояние между вибраторами берут не меньше чем $0,1\lambda$.

Тут же следует оговориться, что уменьшение сопротивления излучения вовсе не означает соответствующее уменьшение мощности излучения. Если антенна резонансна, то вся подводимая мощность поглощается ею независимо от величины входного сопротивления (если, конечно, соблюдаются условия согласования). Понижение сопротивления излучения приводит к некоторому уменьшению мощности излучения из-за ухудшения к. п. д. антенны, однако получение выигрыша в мощности за счет увеличения направленности обычно для нас значительно важнее.

Чаще всего в качестве излучателей в противофазных антеннах используют полуволновые вибраторы.

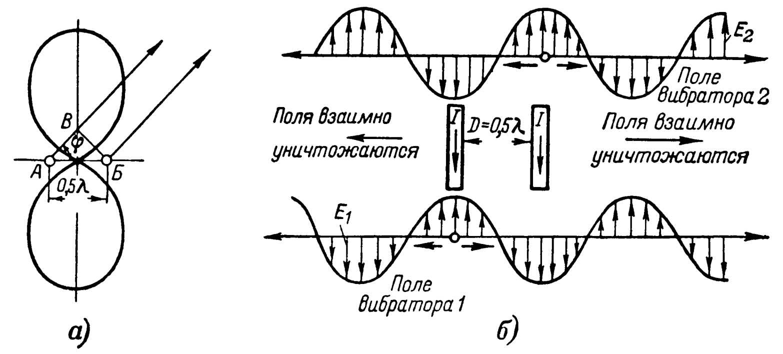
В отличие от противофазных систем синфазные антенны излучают электромагнитные волны при любых расстояниях между проводами. При малых расстояниях между ними разность хода по любым направлениям незначительна, и система обладает диаграммой направленности, мало отличающейся от диаграммы одиночного излучателя. Такая антенна при одинаковом токе излучает бо́льшую мощность, чем одиночный провод, что эквивалентно увеличению ее сопротивления излучения. Это широко используется в так называемых шлейфовых антеннах, которые будут описаны в следующем параграфе.

Увеличение расстояния между излучателями приводит к тому, что по некоторым направлениям разность хода получается значительной, и антенна приобретает направленные свойства.

В качестве примера рассмотрим случай, когда расстояние между излучателями равно половине длины волны (фиг. 51). Из фиг. 51,*а* видно, что синфазные системы имеют максимум излучения в направлении перпендикуляра к прямой, соединяющей излучатели, так как волны, излученные обоими вибраторами в этом направлении, не приобретают разности хода и, следовательно, усиливают друг друга.

В других направлениях появляется некоторая разность хода, возрастающая по мере уменьшения угла φ. Наибольшего значения разность хода достигает в направлении прямой, соединяющей оба излучателя. В данном случае она

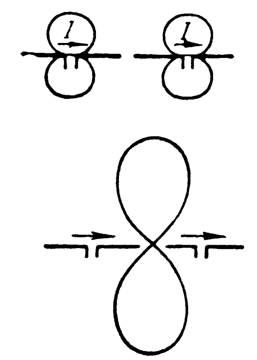
равна половине волны. Поэтому в этом направлении излученные волны уничтожаются (фиг. 51,*б*). Таким образом, результирующая полярная диаграмма направленности имеет



Фиг. 51. Излучение системы синфазных антенн.

а — диаграмма направленности двух синфазных антенн; *б* — сложение волн двух синфазных излучателей.

максимум в направлении, по которому противофазная антенна имела нуль излучения, и нуль излучения в направлении, по которому противофазная система имела максимум излучения. Антенные системы, максимум излучения которых лежит в направлении перпендикуляра к плоскости, в которой располагаются излучатели, называются *поперечными излучателями*.



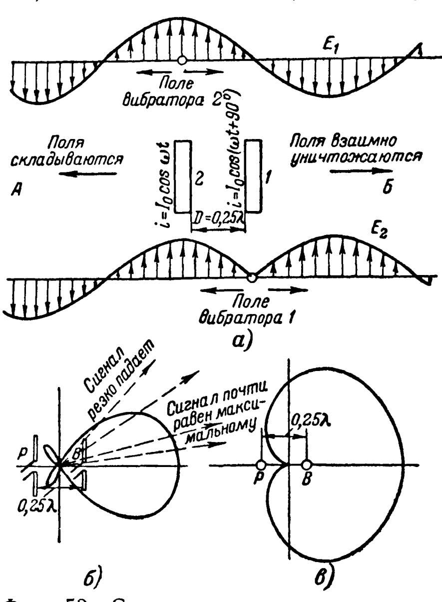
Фиг. 52. Излучение синфазных антенн, вытянутых в одну линию.

Из сказанного напрашивается вывод: диаграмму направленности системы, состоящей из вибраторов, расположенных на расстоянии полуволны, можно повернуть на угол в 90° изменением на обратное направления тока в одном из проводов каждой пары вибраторов.

Как в противофазных системах, увеличение числа вибраторов приводит к увеличению направленности антенны.

Теперь посмотрим, как изменится излучение синфазной системы, если излучатели расположить не параллельно друг другу, а вытянуть в одну линию (фиг. 52). В качестве излучателей возьмем, как это обычно и делается, симметричные полуволновые вибраторы.

В этом случае сами излучатели в плоскости чертежа обладают некоторой направленностью, которая увеличивает направленность всей системы: в перпендикулярном к оси направлении складываются волны, имеющие максимальную интенсивность; в боковых же направлениях ослабление излучения создается не только за счет появления разности хода, но и за счет того, что излучение самих вибраторов по этим направлениям уменьшено.



Фиг. 53. Система с однонаправленным излучением.

а — сложение волн двух вибраторов при сдвиге фазы токов на 90° друг относительно друга, *б* — диаграмма направленности системы в вертикальной плоскости, *в* — диаграмма направленности системы в горизонтальной плоскости.

Если сделать противофазную систему из вытянутых по одной прямой вибраторов, то в том направлении, где противофазная система создает максимальное усиление, будет нуль излучения, поскольку сами вибраторы в этом направлении ничего не излучают. Поэтому противофазные антенны выполняются только из параллельно расположенных излучателей, в то время как синфазные системы могут выполняться как из параллельных, так и из вытянутых в одну линию вибраторов.

Рассмотрение синфазных и противофазных антенных систем приводит к выводу, что направленные свойства антенн, составленных из разнесенных на некоторое расстояние вибраторов, определяются величиной этого расстояния и сдвигом фаз токов в проводах.

Как синфазные, так и противофазные антенны обладают двухнаправленным излучением.

Однонаправленное излучение получается, когда в излучателях, расположенных на расстоянии в четверть волны друг от друга, токи сдвинуты по фазе один относительно другого на четверть периода.

Предположим, что ток в вибраторе *1* (фиг. 53,*а*) опережает по фазе на 90° ток, протекающий в вибраторе *2*. Волна, вышедшая из первого вибратора и двигающаяся в сторону второго вибратора, достигнет его через промежуток времени

$$t = \frac{\lambda}{4c} = \frac{T}{4}. \quad (63)$$

В это время ток в нем будет иметь такую же фазу, какой обладал ток в первом вибраторе, создавший данную волну. Поэтому волна, излученная в этот момент времени вторым вибратором, будет синфазна с волной, пришедшей от первого вибратора. Они будут складываться и в направлении *А* произойдет усиление излучения.

В противоположном направлении *Б* имеет место обратная картина. Когда волна, излученная вторым вибратором, ток в котором отстает на четверть периода от тока первого вибратора, достигнет второго вибратора, пройдет еще четверть периода. Ток в первом вибраторе к этому моменту времени уже на полпериода опередит ток второго вибратора, создавшего подошедшую волну. Поэтому она окажется в противофазе с волной, излученной первым вибратором, в результате чего в направлении *Б* происходит уничтожение излучения. По другим направлениям вследствие добавочной разности хода будет происходить либо частичное уничтожение, либо частичное сложение обеих волн.

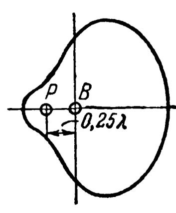
Характеристика направленности данной системы приведена на фиг. 53,*б* и *в*. Из нее видно, что вибратор, в котором ток опережает по фазе ток другого вибратора, как бы отражает излученные последним волны и посылает их в противоположном направлении. Благодаря такому действию первого вибратора его называют *рефлектором*.

Однонаправленность может быть получена и при других расстояниях между излучателями, но тогда разность фаз токов в них должна быть иной. Если, например, сделать расстояние меньше четверти волны, то для того чтобы волна, достигшая рефлектора, встретила противофазную волну, нужно, чтобы ток в рефлекторе опережал ток в антенне на угол больше 90°.

В случае уменьшенных расстояний между антенной и рефлектором даже по главному направлению у излученных волн создается некоторая разность фаз, поэтому уменьшение излучения по боковым направлениям будет более резким, чем в случае расстояния в четверть волны и диаграм-

ма направленности таких антенн будет у́же, и выигрыш антенны с рефлектором возрастет.

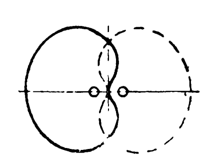
Волна, излученная антенной и падающая на рефлектор, наводит в нем значительные токи. Если наведенный ток будет опережать по фазе на 90° ток в антенне, то рефлектор будет выполнять свои функции, не требуя самостоятельного питания. Нужный сдвиг фаз всегда можно установить соответствующей настройкой рефлектора, заключающейся в подборе его длины. При этом рефлектор может представлять для наведенных токов активное, емкостное или индуктивное сопротивления, в результате чего токи в нем окажутся на тот или иной угол сдвинуты по фазе по отношению к возбуждающей волне.



Фиг. 54. Диаграмма направленности антенны с пассивным рефлектором.

Однако вследствие того, что ток, наведенный в рефлекторе, всегда меньше тока в антенне, полной компенсации излучения назад достигнуть не удается. Поэтому диаграмма направленности антенны с таким рефлектором (фиг. 54) всегда будет несколько хуже диаграммы антенны с питаемым рефлектором.

Рефлекторы, не требующие самостоятельного питания и возбуждающиеся полем излучения антенны, называются *пассивными* в отличие от рефлекторов, питаемых от генератора, которые называют *активными*.


Фиг. 55. Изменение диаграммы антенны с рефлектором при изменении фазы тока в одном из вибраторов на 180°.

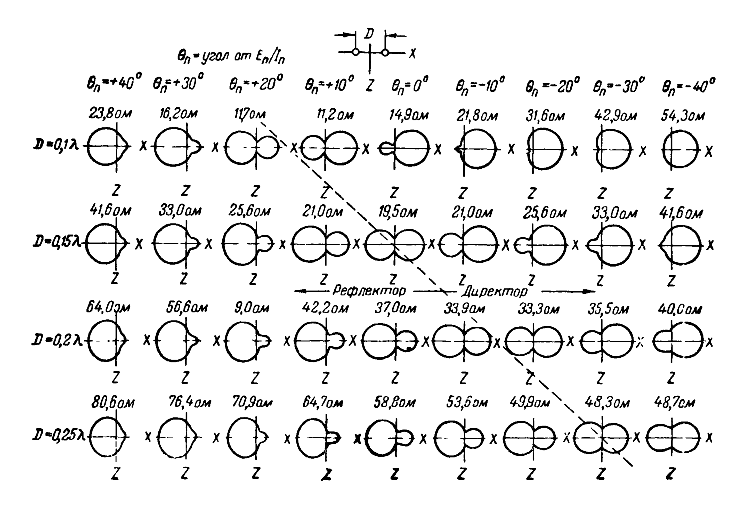
Антенны, снабженные пассивными рефлекторами, имеют более простую систему питания и менее сложны в настройке. Поэтому они получили самое широкое распространение.

Рассмотрение системы антенна — рефлектор показало, что роль рефлектора выполняет тот вибратор, фаза тока в котором опережает фазу тока в другом вибраторе. Легко заставить вибраторы поменяться ролями, изменив, например, направление тока в одном из них на обратное. При этом диаграмма направленности антенны изменит свою ориентацию на 180° (фиг. 55).

То же самое нетрудно осуществить и в системе антенна — пассивный вибратор. Здесь открываются весьма широкие возможности, потому что вид и положение диаграммы направленности определяются одновременно расстоянием

между вибраторами и настройкой пассивного элемента. Например, если укорачивать расстояния между вибраторами, сопротивление излучения антенны уменьшается, но зато получается хорошее ослабление излучения назад.

Возможности, которые здесь имеются, иллюстрирует серия диаграмм направленности антенны с пассивным вибратором (фиг. 56), полученных при различных расстояниях между вибраторами и различной настройке пассивного элемента. На фиг. 56 в каждом горизонтальном ряду изо-



Фиг. 56. Диаграммы направленности и сопротивление излучения антенн с пассивными вибраторами при различных расстояниях между ними и различной настройке.

бражены диаграммы направленности антенны с пассивным элементом, расположенные на одном фиксированном расстоянии друг от друга при различной настройке пассивного элемента. Настройку пассивного излучателя характеризует угол сдвига фаз θ между током и напряжением в нем. Рассматривая вертикальные ряды, можно проследить, как изменяется диаграмма направленности системы при фиксированной настройке пассивного элемента и различных расстояниях между излучателями.

Легко видеть, что при различной расстройке и при одном и том же расстоянии пассивный вибратор может либо почти не влиять на направленность антенны, либо играть роль зеркала, либо, наоборот, направлять излуче-

ние на себя. В этом случае пассивный элемент называют *директором*.

Точно так же, рассматривая вертикальные ряды диаграмм, можно убедиться, что пассивные элементы, имеющие одинаковый сдвиг фаз, могут играть роль рефлектора или директора в зависимости от расстояния до антенны. При этом заметно, что с уменьшением расстояния компенсация излучения назад получается много лучше, чем при больших расстояниях. Это объясняется увеличением амплитуды силы тока, наведенного в пассивном элементе при сближении его с антенной.

В антенной технике широко используются как рефлекторы, так и директоры, а в некоторых случаях то и другое вместе.

17. Излучение антенн над поверхностью хорошо и плохо проводящей земли

В § 13 настоящей главы было показано, что вертикальная антенна над хорошо проводящей землей образует со своим зеркальным изображением систему двух синфазных излучателей, а горизонтальная антенна и ее зеркальное изображение образуют противофазную систему. Таким образом, земля оказывает на горизонтальный и вертикальный вибраторы разное воздействие, поэтому их приходится рассматривать по отдельности.

Горизонтальный провод, поднятый на высоту, малую по сравнению с длиной волны, практически ничего излучать не будет, так как при этом он образует со своим зеркальным изображением обычную двухпроводную длинную линию.

С увеличением высоты расстояние между антенной и ее зеркальным изображением растет и когда оно становится соизмеримым с длиной волны, они образуют излучающую противофазную систему. Естественно, что вид характеристики излучения будет изменяться в зависимости от высоты. На фиг. 57,*а* приведены диаграммы направленности полуволнового диполя над землей, построенные в плоскости, перпендикулярной к его оси.

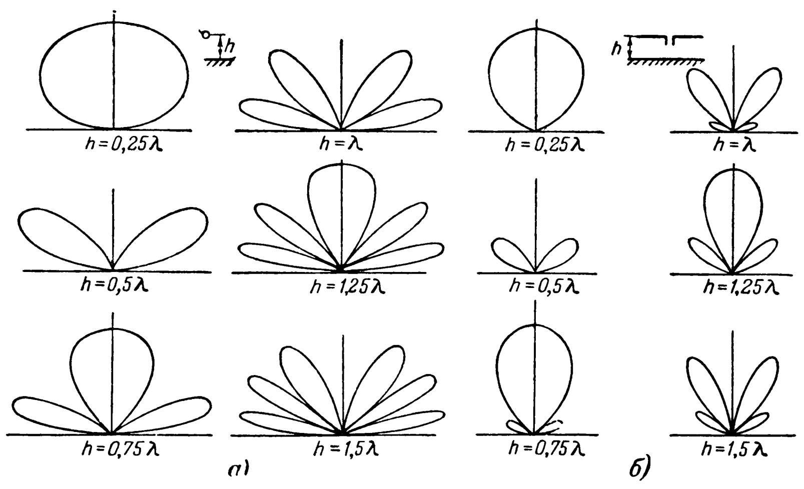
Рассмотрение этих диаграмм приводит к выводу, что горизонтальная антенна, расположенная над хорошо проводящей землей, не излучает энергии вдоль поверхности земли.

В вертикальной плоскости, проходящей через оси вибраторов, происходят аналогичные изменения интенсивно-

сти излучения по различным направлениям. Но в этой плоскости сама антенна излучает неравномерно.

Для нахождения диаграмм направленности в этой плоскости воспользуемся общим правилом нахождения диаграмм сложных систем.

В подавляющем большинстве случаев сложные антенные системы строятся так, что отдельные излучатели, входящие в них, имеют одинаковые диаграммы направленности и одинаково ориентируются в пространстве. Это позволяет найти результирующую диаграмму направленности антенны в два приема.



Фиг. 57. Диаграммы направленности полуволнового диполя над хорошо проводящей землей.

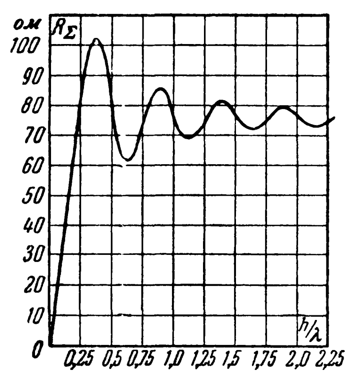
а — в плоскости, перпендикулярной оси; *б* — в плоскости, проходящей через ось.

Прежде всего рассчитывается результирующая диаграмма направленности системы в предположении, что все ее элементы излучают энергию равномерно по всем направлениям с некоторой средней интенсивностью, а затем учитывают, что по тем направлениям, по которым вибраторы излучают больше или меньше, результирующее излучение будет пропорционально больше или меньше. Учесть это можно, умножив графически или аналитически диаграммы системы ненаправленных излучателей на диаграмму направленности самих излучателей (построенную в относительных единицах). На фиг. 57,*б* представлены полученные, таким образом, диаграммы направ-

ленности полуволнового вибратора, поднятого на высоту h в плоскости, проходящей через его ось.

Из приведенных графиков видно, что с увеличением высоты возрастает число лепестков в диаграмме направленности излучателя и одновременно увеличивается направленность его излучения. В направлении максимального излучения поле горизонтальной антенны превышает поле ненаправленного излучателя в 1,4—1,7 раза при изменении высоты подвеса от $h = 0{,}25\lambda$ до $h = 0{,}5\lambda$, т. е. выигрыш получается небольшой.

Важно заметить, что с увеличением высоты подвеса антенны возрастает интенсивность излучения под малыми углами к горизонту. При этом чем выше подвешена антенна, тем ближе к горизонту располагается нижний лепесток.



Фиг. 58. Зависимость сопротивления излучения горизонтального полуволнового вибратора от высоты подвеса над землей.

Излучение под углами, близкими к вертикали, при изменении h периодически то появляется, то исчезает.

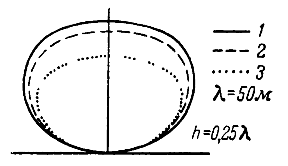
На фиг. 58 приведена зависимость сопротивления излучения горизонтального полуволнового вибратора от высоты расположения над землей. Она показывает, что сопротивление излучения быстро возрастает с увеличением высоты, достигая на высоте $h = 0{,}25\lambda$ величины сопротивления излучения диполя в свободном пространстве. При дальнейшем увеличении высоты сопротивление излучения практически изменяется очень мало. Следовательно, ориентировочные энергетические расчеты вибраторов, подвешенных на высоте более $0{,}25\lambda$, можно производить без учета влияния земли; тем более, что точный учет его затруднен различием электрических свойств земной поверхности.

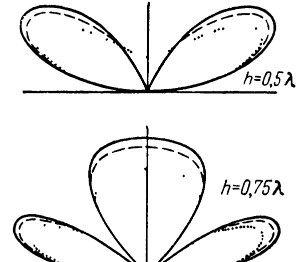
Сопротивление излучения антенн других размеров изменяется таким же образом, и при расчетах допустимо пользоваться графиком фиг. 58 при соответствующем увеличении или уменьшении абсолютной величины сопротивления излучения.

Если поверхность земли под антенной не обладает свойствами идеального проводника, электрическое поле антен-

чы наводит в толще поверхностных слоев переменные токи, имеющие значительную вертикальную составляющую. Эти токи также участвуют в создании результирующего поля излучения антенны, в результате чего поле антенны, подвешенной над поверхностью земли, содержит не только горизонтально, но и вертикально поляризованные волны.

Поскольку земля представляет для этих токов некоторое сопротивление, то значительная доля энергии, излучаемая антенной, будет поглощаться. Чем ближе антенна к земле, тем значительнее потери и меньше ее к. п. д.





Фиг. 59. Характеристики излучения горизонтальных антенн в вертикальной плоскости над поверхностью земли различной проводимости.

1 — морская вода; *2* — сырая почва; *3* — сухая почва.

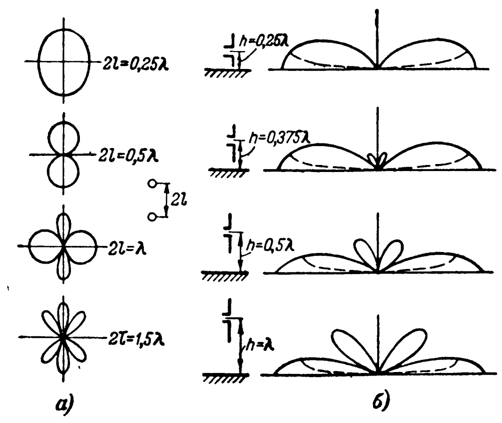
В результате поглощения в почве отраженные земной поверхностью волны имеют меньшую интенсивность, чем в случае отражения от идеально проводящей земли, в которой поглощение энергии отсутствует. Поэтому результирующее поле над поверхностью земли изменяется. Наибольшие изменения будут наблюдаться при низком расположении антенны. Эффект ухудшения проводимости земли в этом случае приводит к повороту характеристики излучения полуволнового диполя на 90°. Максимум излучения в горизонтальной плоскости оказывается направленным вдоль его оси.

Этот эффект по-разному проявляется при различной высоте подвеса антенны и различной проводимости земли. В общем случае излучение горизонтального диполя в направлении оси не будет равным нулю, что благоприятно для ненаправленной работы.

На фиг. 59 приведены экспериментально снятые характеристики излучения горизонтальных антенн в вертикальной плоскости над хорошо проводящей поверхностью *1* (морская вода), над полупроводящей поверхностью *2* (сырая почва) и над плохо проводящей поверхностью *3* (сухая почва) на волне 50 *м*. Они показывают, что с ухудшением проводимости почвы результирующее поле несколько уменьшается, однако эти изменения не являются сущест-

венными. Поэтому на практике пользуются диаграммами, полученными для горизонтальных антенн над идеально проводящей землей.

Вертикальные антенны, излучающие над идеально проводящей землей, образуют со своим зеркальным изображением синфазную систему вытянутых по одной линии вибраторов. Такая система имеет максимум излучения в плоскости, перпендикулярной их оси, т. е. в горизонтальной плоскости, и минимум излучения в направлении вертикали.



Фиг. 60. Излучение вертикальных антенн над землей.

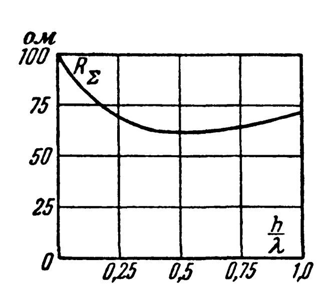
а—диаграммы направленности двух синфазных антенн при различных расстояниях между ними, *б* — диаграмма вертикальных антенн на различной высоте над землей (пунктир соответствует случаю плохо проводящей земли).

На фиг. 60,*а* приведены характеристики излучения двух синфазных ненаправленных излучателей при различных расстояниях между ними.

На фиг. 60,*б* приведены характеристики излучения полуволнового симметричного диполя на различной высоте над землей. С увеличением высоты подвеса возрастает число лепестков диаграммы направленности и увеличивается направленность излучения в направлении к горизонту. Новые лепестки появляются под большими углами к горизонту, но с увеличением высоты подвеса антенны увеличивают свою интенсивность и опускаются вниз; одновременно они сужаются, и направленность излучения возрастает.

Несколько иначе обстоит дело с излучением несимметричных заземленных антенн. Они вместе со своими зер-

кальными изображениями образуют симметричные антенны, характер излучения которых целиком определяется их длиной. Поэтому для нахождения соответствующей диаграммы направленности нужно пользоваться характеристиками излучения симметричных антенн различной длины, приведенными на фиг. 48. Сопротивление излучения вертикальных антенн меньше, чем у горизонтальных антенн, зависит от высоты подвеса. При минимальной высоте подвеса, когда нижний конец антенны находится на уровне земли, сопротивление излучения полуволнового вибратора равно 100 *ом*, что соответствует половине сопротивления излучения волнового вибратора, образуемого антенной и ее зеркальным изображением. При увеличении высоты центра антенны над землей сопротивление излучения быстро падает до величины сопротивления излучения полуволнового вибратора в свободном пространстве (73,1 *ом*). Начиная с высоты $h = 0{,}25\lambda$ (фиг. 61), все энергетические расчеты вертикальных антенн можно производить, не учитывая влияние земли.



Фиг. 61. Зависимость сопротивления излучения вертикального симметричного диполя от высоты подвеса над землей.



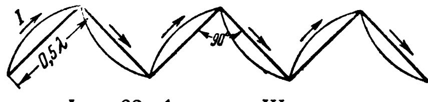
Фиг. 62. Излучение несимметричной антенны над землей.
1 — хорошо проводящая земля; *2* — полупроводящая земля; *3* — плохо проводящая земля.

В том случае, когда земля обладает плохой проводимостью, основные изменения создаются в характеристике излучения под низкими углами к горизонту. Влияние поглощения в земле сказывается в том, что исчезает излучение вдоль земной поверхности, и нижний лепесток диаграммы направленности приобретает вид, показанный на фиг. 60 пунктирной линией. Одновременно появляется небольшой добавочный лепесток под большим углом к горизонту, однако интенсивность его невелика и обычно его не учитывают. Естественно, что вследствие поглощения, результирующее поле излучения будет ослаблено по сравнению

со случаем идеально проводящей земли. Это достаточно хорошо видно из характеристик излучения, приведенных на фиг. 62, где характеристика *1* соответствует вертикальной антенне над хорошо проводящей землей, *2*—над полупроводящей и *3* — над плохо проводящей землей. Эти характеристики показывают, что основное влияние плохой проводимости земли выражается в ослаблении поля и эффекте «отброса» нижнего лепестка диаграммы направленности от поверхности земли. Это нужно иметь в виду для внесения соответствующих поправок при пользовании приводимыми в справочниках в учебниках характеристиками антенн.

18. Сложные вибраторы

Вследствие того, что антенны с большим сопротивлением излучения обладают высоким к. п. д., имеют малые токи и напряжения при резонансе, просты в настройке и регулировке,—всегда стремятся к максимальному увеличению сопротивления излучения антенны. Весьма плодотворная идея решений этой задачи, впервые предложенная А. А. Пистолькорсом, получила многообразное воплощение в различных типах шлейф-вибраторов.



Фиг. 63. Антенна Ширкеса.

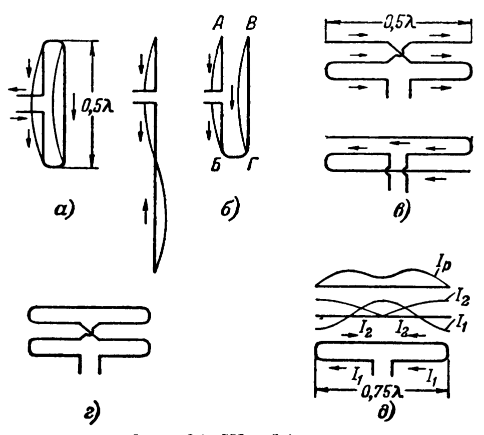
Увеличение длины излучающего провода приводит к возрастанию сопротивления излучения. Однако у линейных проводов нарастание сопротивления излучения происходит не монотонно, периодически сопровождаясь некоторыми уменьшениями (см. фиг. 33).

Устранить периодическое изменение сопротивления излучения при увеличении длины антенны можно двояко. Во-первых, можно согнуть участки с противоположным направлением тока в неизлучающие четвертьволновые шлейфы, как это делается в синфазных антеннах (см. фиг. 29,*м*). Но при этом общая длина проводов, входящих в антенную систему, оказывается почти вдвое больше длины излучающей части. В соответствующее число раз возрастет сопротивление потерь. Поэтому этот путь повышения сопротивления излучения является не лучшим и синфазные антенны из проводов, вытянутых в одну линию, применяются только для получения направленного излучения.

Во-вторых, можно согнуть антенный провод в тех местах, где начинает течь ток противоположного направления.

Тогда пространственное направление токов в антенной системе уже не будет противоположным на отдельных участках и при угле изгиба в 90° компенсирующее действие их излучения сводится к нулю. Образующаяся при этом система носит название антенны Ширкеса (фиг. 63).

Если угол изгиба сделать равным 180°, го пространственное направление токов в антенне станет везде одинаковым. При небольшом по сравнению с длиной волны расстоянии между излучающими участками созданные ими волны при-



Фиг. 64. Шлейф-антенны.

а — петлевой вибратор; *б* — петлевой вибратор без перемычки; *в* — тройные вибраторы; *г* — четырехэлементный вибратор; *д* — вибратор с измененной длиной.

ходят в любые точки пространства с одинаковой фазой и усиливают друг друга.

На фиг. 64 приведены типичные примеры шлейф-вибраторов, работающих по данному принципу. Все они имеют общую длину, равную целому числу полуволн, и являются поэтому резонансными системами, выходное сопротивление которых носит чисто активный характер. Ток от генератора последовательно обтекает синфазные излучающие элементы, представляющие собой обычно полуволновые вибраторы.

В отличие от синфазных антенн из вибраторов, вытянутых в одну линию, такие системы не содержат неизлучающих проводов, поэтому сопротивление потерь в них имеет минимальную величину. Зато диаграмма направленности шлейф-вибраторов практически не отличается от диаграммы простого полуволнового диполя.

На фиг. 64,*а* показана двухвибраторная шлейф-антенна, которую часто называют также петлевым вибратором. В нем конец *В* соединен с концом первого вибратора *А* для того, чтобы не нарушать симметрии системы. В противном случае (фиг. 64,*б*) в питающем фидере потекут различные токи, и он создаст интенсивное излучение в окружающем пространстве. Необходимо обратить внимание на то, что оба вибратора при этом оказываются соединенными не параллельно, как это могло бы показаться на первый взгляд, а последовательно.

В тех случаях, когда в антенне укладывается нечетное число полуволн (фиг. 64,*в*), система получается симметричной и производить соединение концов не нужно.

На фиг. 64,*г* изображена четырехэлементная антенна. Из приведенных примеров видно, что во всех проводах, образующих сложные вибраторы, одновременно текут одинаковые синфазные токи. Поскольку они располагаются в непосредственной близости друг от друга, то такую систему можно рассматривать как единый вибратор, в котором течет ток

$$I_A = nI_{A1}, \qquad (64)$$

где n — число вибраторов (элементов) в системе;
I_{A1} — величина тока в элементах.

Тогда мощность излучения сложного вибратора может быть подсчитана по общей формуле

$$P_\Sigma = \frac{1}{2}(nI_{A1})\ R_{\Sigma 1} = \frac{1}{2} n^2 I_{A1}^2 R_{\Sigma 1}, \qquad (65)$$

где $R_{\Sigma 1}$ — сопротивление излучения полуволнового вибратора.

Отсюда

$$R_\Sigma = n^2 R_{\Sigma 1}, \qquad (66)$$

т. е. сопротивление излучения сложного вибратора равно сопротивлению излучения отдельного элемента, умноженного на квадрат числа элементов, входящих в его состав.

Экспериментальная проверка этой зависимости показала, что увеличение сопротивления излучения происходит даже в несколько большей степени, чем то, которое получается при подсчете по приведенной выше формуле. Так, для двухэлементного вибратора получается

$$R\ = 320\ \textit{ом},$$

а для трехэлементного вибратора

$$R_{\Sigma} = 640\ ом.$$

Эти значения сопротивления излучения настолько велики, что двух- и трехэлементные вибраторы можно непосредственно согласовывать с открытыми двухпроводными линиями, что является весьма ценным свойством.

Диапазонные свойства сложных вибраторов оказываются также много выше, чем у обычных излучателей. Они допускают, например, удовлетворительную работу без перестройки антенного тракта внутри любого любительского диапазона; при работе же с обычным вибратором, коэффициент бегущей волны в фидере изменяется в диапазоне примерно в 2 раза.

Данные свойства являются также чрезвычайно ценными при широкополосной работе, например, при передаче и приеме частотно модулированных сигналов, в телевидении, телеуправлении и радиолокации.

Величину сопротивления излучения можно подбирать, производя изгиб не в точках, где ток меняет свое направление, а в некоторых промежуточных положениях. Тогда в отдельных частях вибраторов будут течь противофазные токи, и эффект увеличения сопротивления излучения будет несколько ослаблен. Например, для согласования вибратора с 500-омной воздушной линией, очень удобно применять петлевой вибратор, состоящий из двух вибраторов длиной в 0,75 λ, изображенный на фиг. 64,*д*. Полная длина провода такого вибратора равна 1,5 λ, поэтому он является резонансной системой. Распределение тока в обоих проводах различно. Эффективное распределение тока в вибраторе приведено на фиг. 64,*д*. Диаграмма направленности такой системы мало отличается от диаграммы направленности полуволнового вибратора. Сопротивления излучения ее

$$R_{\Sigma} = 500\ ом.$$

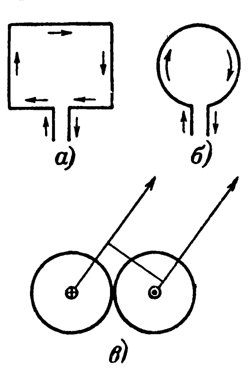
В ряде случаев можно одновременно влиять на сопротивление излучения и на вид диаграммы направленности.

19. Рамочная антенна

В отличие от рассмотренных выше антенн, рамочная антенна (фиг. 65,*а* и *б*) используется на волнах много больше резонансной. Ее можно представить себе как расширенный конец короткозамкнутого фидера. Собственная волна рамки

обычно в 4—6 раз длиннее общей протяженности входящих в нее проводов. Настройка ее производится с помощью конденсаторов или катушек индуктивности, включаемых на входе. Вследствие того, что размеры рамочной антенны обычно много меньше длины рабочей волны, токи в противолежащих сторонах ее имеют противоположное направление.

Рамочная антенна обладает в горизонтальной плоскости диаграммой направленности, имеющей вид восьмерки (фиг. 65,*в*). Происхождение ее нетрудно понять. В направлении перпендикуляра к плоскости антенны противофазные волны, излученные противолежащими сторонами, не приобретают разности хода и взаимно уничтожаются. По другим направлениям полного уничтожения не произойдет вследствие появляющейся разности хода. Наибольшей величины разность хода достигает в направлении прямой, соединяющей стороны антенны. По этому направлению излучение максимально интенсивно.



Фиг. 65. Рамочная антенна.

а — квадратная рамка; *б* — круглая рамка; *в* — диаграмма излучения.

Вследствие малой длины сторон рамочной антенны и расстояния между противофазными излучающими элементами сопротивление излучения и действующая высота такой антенны очень малы. Поэтому рамочные антенны редко используются в передатчиках. В приемной технике рамочные антенны находят широкое применение.

Для увеличения действующей высоты рамочной антенны ее можно выполнить из нескольких витков провода. Форма контура рамки при этом может быть как прямоугольной, так и круглой.

Рассмотрение вопросов передачи высокочастотной энергии по проводам и излучения электромагнитных волн, проведенное в первой части, позволит понять целесообразность построения тех или иных антенн для различных диапазонов волн, особенности их работы, питания, настройки и эксплуатации.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

АНТЕННЫ РАДИОВЕЩАТЕЛЬНОГО И ПРОМЕЖУТОЧНОГО ДИАПАЗОНОВ ВОЛН

20. Особенности распространения электромагнитных волн радиовещательного диапазона

Для того чтобы решить вопрос о целесообразности применения той или иной конструкции антенны, необходимо в первую очередь рассмотреть особенности распространения излучаемых ею радиоволн.

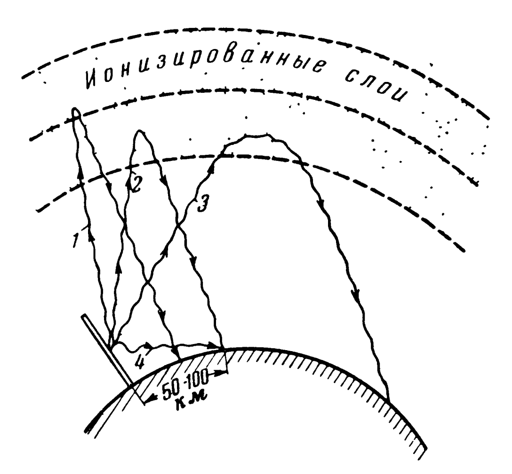
Всякая антенна, не обладающая острой направленностью, излучает часть энергии вдоль земной поверхности, создавая так называемые *земные или поверхностные лучи*, и часть энергии — под различными углами возвышения, образуя так называемые *пространственные лучи* (фиг. 66).

Роль земного и пространственного лучей для радиосвязи оказывается различной в разных диапазонах волн. Для волн радиовещательного диапазона (3 000—200 *м*) земля является сравнительно хорошим проводником, потери в земле невелики, и эти волны распространяются на значительные расстояния вдоль поверхности земли.

Пространственные лучи на высоте свыше 80 *км* попадают в слои ионизированной атмосферы. Там они вынуждают свободные заряды совершать колебательное движение, вследствие чего последние сами становятся источниками нового электромагнитного излучения. Результатом этого является эффект отражения электромагнитных волн от ионизированных слоев и обратного возвращения их на землю.

Однако далеко не вся энергия электромагнитных волн отражается обратно, часть ее теряется в ионосфере и часть, проходя сквозь ионизированные слои, уходит в мировое пространство.

Поглощение энергии радиоволн в ионосфере возрастает с увеличением длины волны. На длинных волнах (порядка нескольких километров) практически вся энергия пространственного луча поглощается в ионосфере и использовать его для связи не представляется возможным. На средних волнах (порядка нескольких сот метров) поглощение проявляется значительно слабее. Поэтому, если луч проходит в ионосфере сравнительно небольшое расстояние, что прак-



Фиг. 66. Распространение радиоволн, излученных антенной под различными углами к поверхности земли.

1, *2* и *3* — пространственные лучи; *4* — земной луч.

тически имеет место при крутых углах падения (лучи *1*, *2* на фиг. 66), то уже заметная доля энергии возвращается на землю.

Фаза отраженного луча зависит от очень большого числа факторов, имеющих случайный характер, поэтому, складываясь у поверхности земли с земным лучом, отраженный луч вызывает увеличение или уменьшение напряженности поля в месте приема. Поскольку состояние ионосферы подвержено непрерывным изменениям, напряженность результирующего поля также непрерывно меняется. Очевидно, что этот эффект в наибольшей степени проявляется в той области вокруг радиостанции, где интенсивность поверхностного и пространственного луча приблизительно одинакова. Практически это имеет место в зоне 50—100 *км* вокруг радиостанции, вследствие чего прием в этой зоне неустойчив. Опи-

санное выше явление называется явлением ближнего замирания.

Для предотвращения явления ближнего замирания на средних волнах необходимо добиться, чтобы отраженные пространственные лучи возвращались на землю на расстоянии свыше 100 *км* от радиостанции, где земной луч уже теряет значительную долю своей энергии. Это обеспечивается антеннами, имеющими слабое излучение в направлениях, близких к вертикальному.

В коротковолновой части радиовещательного диапазона земной луч играет существенную роль при связи на ближние расстояния, а на расстояниях свыше 1 000 *км* поле определяется почти исключительно пространственным лучом.

Поскольку земля в целом ряде случаев является довольно плохим проводником, то она в значительной степени поглощает энергию волн, распространяющихся вдоль нее. Поэтому для перекрытия больших расстояний радиостанции, работающие земным лучом, должны обладать значительной мощностью.

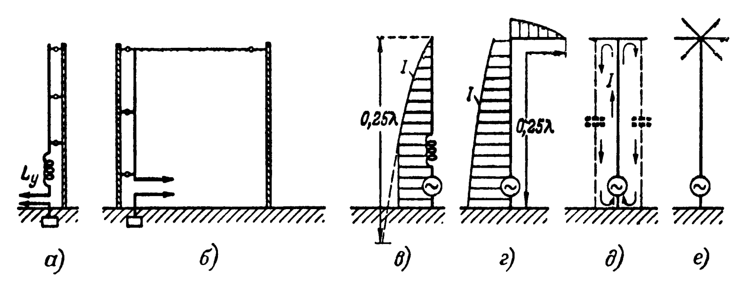
Вследствие того, что земная волна вблизи проводящей поверхности имеет вертикальную поляризацию, основной излучающей частью антенны должна быть ее вертикальная часть. Для получения наибольшей интенсивности излучения высота антенны должна быть возможно большей. Приемные антенны для этого диапазона волн также должны обладать значительной вертикальной частью.

21. Антенны радиовещательного диапазона

Для того чтобы антенна была резонансной и имела достаточно большие сопротивления излучения и к. п. д., размеры ее должны приближаться по крайней мере к $0{,}25\lambda$, т. е. для длинноволнового диапазона высота ее должна быть равной нескольким сотням метров. Практически же удается построить антенны (мачты) высотой не свыше 200—300 *м*. Поэтому на волнах длиннее 1 000 *м*, как правило, приходится работать с антеннами, имеющими длину меньше резонансной. Следствием этого является то, что входное сопротивление антенны имеет реактивную составляющую емкостного характера, для компенсации которой последовательно с антенной приходится включать катушки индуктивности (фиг. 67,*а*). Эти катушки называют *удлинительными*. Сопротивление излучения и к. п. д. такой антенны оказываются низкими.

На средних волнах при работе антенны в широком диапазоне частот может оказаться, что частота подводимых к ней колебаний будет ниже резонансной. В этом случае реактивная составляющая ее входного сопротивления будет иметь индуктивный характер, и для настройки антенны придется применять конденсатор. Его принято называть *укорачивающим*. В общем случае цепь настройки диапазонной антенны должна содержать как емкость, так и индуктивность.

Применение элементов настройки не изменяет сопротивление излучения антенны, которое определяется только ее электрической длиной и поэтому при работе с короткими



Фиг. 67. Антенны для радиовещательного и промежуточного диапазона волн.

а — несимметричный вибратор с удлинительной катушкой; *б* — Г-образная антенна; *в* — распределение тока в антенне с удлинительной катушкой; *г* — распределение тока в Г-образной антенне; *д* — Т-образная антенна, *е* — зонтичная антенна.

антеннами сопротивление излучения всегда невелико. Следствием этого является большая амплитуда токов и напряжений в антенне.

Малое сопротивление излучения приводит также к тому, что резонансная характеристика антенны становится очень острой, вследствие этого антенна очень критична в настройке. Кроме того, при низком сопротивлении излучения приходится особенно тщательно выполнять заземление нижнего конца антенны, ибо в противном случае резко снижается к. п. д. системы.

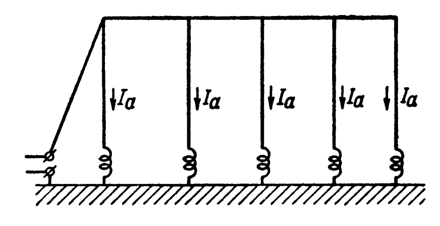
Введение элементов настройки приводит к увеличению сопротивления тепловых потерь антенны и снижает ее и без того низкий к. п. д.

Вместо введения катушки индуктивности можно увеличить длину антенны до резонансной и согнуть ее на высоте мачты под прямым углом, образовав оставшейся частью горизонтальный участок. Такая Г-образная антенна излучает

лучше, чем прямая антенна с удлинительной катушкой, но она требует установки второй мачты (фиг. 67,*б*).

Если высота подвеса Г-образной антенны невелика, горизонтальная часть ее практически не излучает, так как она образует со своим зеркальным изображением двухпроводную линию. Зато распределение тока в излучающей вертикальной части существенно улучшается. В ней укладывается часть стоячей волны тока, близкая к пучности и пучность располагается ближе к верхнему концу, который находится в наиболее благоприятных для излучения условиях.

Увеличить амплитуду тока на конце антенны можно, также устраивая дополнительную горизонтальную часть в виде двух горизонтальных лучей (Т-образная антенна на фиг. 67,*д*) или в виде многих лучей (зонтичная антенна на фиг. 67,*е*). Во всех этих случаях горизонтальные элементы образуют с землей некоторую емкость. Благодаря этому амплитуда тока на конце вертикальной части антенны уже не равна нулю и распределение тока вдоль нее становится более равномерным. Площадь тока, а следовательно, и действующая высота антенны увеличиваются.



Фиг. 68. Радиовещательная антенна с увеличенным сопротивлением излучения.

Для увеличения сопротивления излучения радиовещательные антенны часто выполняются в виде нескольких вертикальных вибраторов, питаемых от одного генератора. Вибраторы располагаются на расстояниях, много меньших длины волны, и связываются верхними горизонтальными частями (фиг. 68).

Как уже было сказано, для уничтожения эффекта ближнего замирания антенна должна иметь максимум излучения в направлении малых углов к горизонту и минимум в направлении больших углов. Если посмотреть на характеристики излучения заземленных вибраторов различной длины (фиг. 69), то нетрудно видеть, что наилучшими с этой точки зрения будут вибраторы с электрической длиной от $l = 0{,}25\ \lambda$ до $l = 0{,}5\ \lambda$. Подробное исследование этого вопроса показало, что наивыгоднейшей длиной антенны с точки зрения устранения эффекта ближнего замирания является длина, немного большая полуволны, а именно $l \approx 0{,}528\,\lambda$.

На средних волнах создание такой антенны вполне возможно.

Однако еще более благоприятную диаграмму излучения в вертикальной плоскости будет иметь антенна, у которой около вершины нет узла тока, что достигается созданием на ее конце некоторой емкости.

Значительный вклад в развитие техники антенн без ближнего замирания внесли советские ученые. Проф. Г. З. Айзенбергом разработана принятая в Советском Союзе система средневолновых антенн с верхним питанием.

Фиг. 69. Диаграмма направленности в вертикальной плоскости несимметричных заземленных антенн различной длины.

22. Особенности распространения промежуточных волн

Диапазон волн от 200 до 100 *м* принято называть диапазоном промежуточных волн, так как свойства их распространения имеют промежуточный характер между свойствами распространения средних и коротких волн.

Поверхностный луч на этих волнах испытывает значительное поглощение, и связь с помощью него при средней мощности передатчика оказывается возможной лишь на относительно малые расстояния (75—150 *км*).

Пространственные же лучи далеко не все отражаются ионосферой. Чем ближе угол излучения к 90°, тем меньшая доля энергии отражается обратно на землю и большая доля проходит через ионизированные слои в мировое пространство. При достаточно большом угле падения вся энергия пространственного луча проходит без отражения через ионосферу. Угол, при котором отражение радиоволн прекращается, называется *критическим углом*. Естественно, что при углах излучения, больших критического, отражений не наблюдается.

Величина критического угла зависит от состояния ионосферы и от длины рабочей волны. Чем длиннее волна, тем ближе критический угол к 90°.

В рассматриваемом диапазоне длина волн настолько велика, что практически критический угол равен 90°, т. е. фактически все пространственные лучи отражаются ионосферой. Вследствие этого даже на небольших расстояниях от радиостанции существует интенсивное поле отраженных пространственных волн.

Точно так же, как и на средних волнах, сложение пространственной волны с поверхностной создает эффект ближнего замирания. Поэтому, чтобы сделать прием в ближней зоне достаточно устойчивым, нужно добиться, чтобы связь в ней осуществлялась только поверхностным лучом. Как показала практика, хорошие результаты для связи на ближние расстояния получаются при работе с антеннами, обладающими провалом в диаграмме направленности под углами от 45 до 90° и увеличенной интенсивностью излучения под более низкими углами к горизонту. Такую характеристику излучения имеют вертикальные антенны высотой до 0,5 λ.

Вследствие довольно значительного поглощения, испытываемого промежуточными волнами в ионосфере и в земле, они используются обычно только для связи на относительно небольшие расстояния.

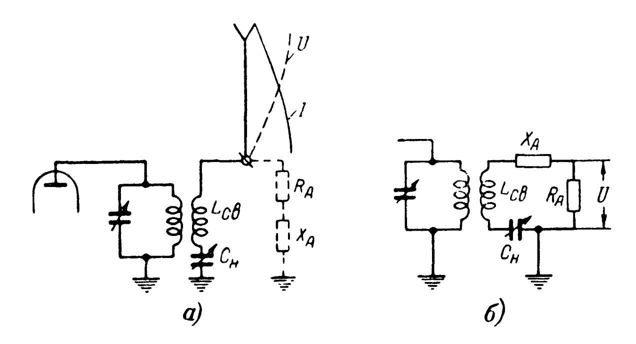
23. Любительские антенны для промежуточных волн

В диапазоне промежуточных волн (160 *м*) остро стоит вопрос о размерах антенных систем. Для того чтобы свести размеры антенны к минимуму, в качестве основной антенны следует выбирать несимметричный заземленный вибратор уменьшенных размеров и настраивать его с помощью удлинительной катушки (фиг. 67,*а*). Можно использовать Г-образные антенны, общая длина которых равна четверти волны. Четвертьволновые Г-образные антенны дают лучшие результаты, так как позволяют исключить удлинительную катушку, вносящую дополнительные потери, и увеличить площадь тока в вертикальной части антенны. Лучшие результаты дает применение Г-образной антенны, горизонтальная часть которой имеет длину около четверти волны. Настройку антенны в этом случае следует производить с помощью конденсатора переменной емкости.

Часто для связи с генератором или фидером применяются высокочастотные трансформаторы. В этом случае емкость

настраивающего элемента должна быть выбрана с учетом необходимости компенсации не только реактивной составляющей антенны, но и индуктивности катушки связи. Цепь антенны приобретает вид, изображенный на фиг. 70,*а*.

На фиг. 70 приведена типичная цепь связи и настройки антенны, называемая *последовательной схемой*. Это название определяется тем, что элемент настройки $C_н$ включается здесь последовательно с элементом связи. Входное сопротивление антенны имеет в общем случае как активную, так и реактивную составляющую (R_A и X_A на фиг. 70,*а*). Реактивная составляющая компенсируется органом настройки, и все напряжение, снимаемое с катушки связи, падает на активной составляющей входного сопротивления антенны. При этом на нем выделяется мощность

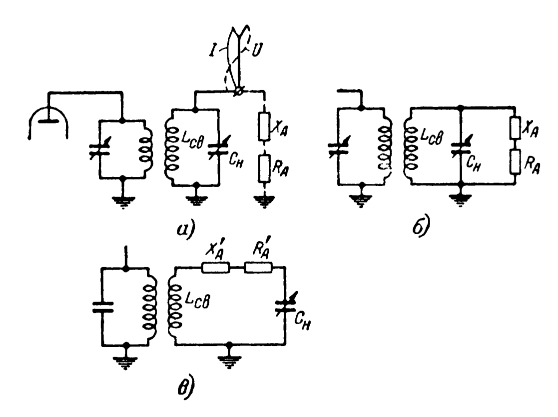


Фиг. 70. Последовательная схема питания антенны.
а — включение элементов настройки; *б* — эквивалентная схема цепи антенны.

$$P_A = \frac{1}{2}\frac{U^2}{R_A}.$$

Если сопротивление R_A достаточно мало, то даже при сравнительно небольшом напряжении U отсасываемая из контура генератора мощность может быть значительной. При большом значении R_A, для того чтобы нагрузить должным образом генератор, может потребоваться такая большая связь антенны с генератором (большое U), которую конструктивно осуществить невозможно. Подобные условия обычно создаются, когда в месте, где к антенне подводится питание, находится узел тока. В этом случае нужно использовать так называемую *параллельную настройку антенны* (фиг. 71). В этой схеме орган настройки

$C_к$ подключен параллельно катушке связи и компенсирует ее реактивность и реактивную составляющую входного сопротивления антенны. Благодаря тому, что входное сопротивление очень велико, оно мало шунтирует контур, состоящий из катушки связи и конденсатора настройки. Поэтому можно пересчитать входное сопротивление антенны в этот контур, где оно выразится эквивалентными параметрами R'_A и X'_A (фиг. 71,*в*), имеющими малую величину. Полученная эквивалентная схема совпадает со схемой по-



Фиг. 71. Параллельная схема питания антенны.
а — включение элементов настройки; *б* — эквивалентная схема цепи антенны; *в* — преобразованная эквивалентная схема.

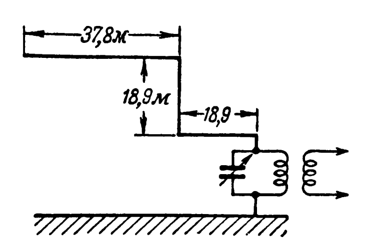
следовательной настройки, которая, как мы выяснили, хорошо работает при малой величине активного сопротивления в контуре.

В передатчиках, работающих в широком диапазоне частот, может оказаться необходимым использовать как тот, так и другой метод настройки. С помощью одного переключателя можно переходить с параллельной схемы настройки на последовательную. Катушка связи наматывается на каркасе диаметром 75 *мм* и содержит 20 витков провода диаметром 2,5 *мм*. Длина намотки около 90 *мм*. Для настройки обычно нужен конденсатор емкостью 250—500 *пф*.

При работе в 160-метровом любительском диапазоне (1,75 ÷ 1,8 *мгги*) можно рекомендовать изготовление полуволновой антенны, изображенной на фиг. 72. Горизонтальная часть антенны равна четверти волны. Вертикальную часть делают сколь возможно большой. Если те или иные

условия не позволяют сделать ее равной четверти волны, то остаток ведут вдоль земли к генератору. Настройку в этом случае осуществляют по параллельной схеме. У такой антенны узел тока находится у основания, поэтому даже при плохом заземлении потери в нем будут невелики.

Нижний горизонтальный участок антенного провода образует со своим зеркальным изображением двухпроводную неизлучающую систему, благодаря чему он существенно не увеличивает потерь и не искажает характеристики излучения антенны. Распределение тока в вертикальной части близко к равномерному и имеет максимум у вершины.

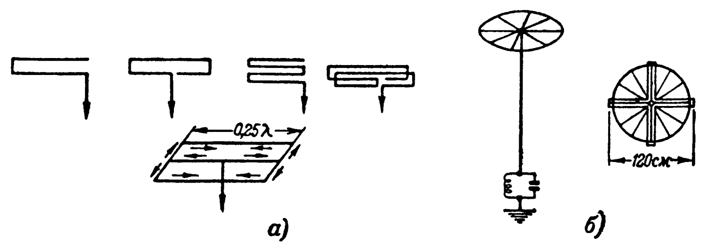


Фиг. 72. Ступенчатая полуволновая несимметричная антенна.

Антенна крепится на двух мачтах по возможности в открытом пространстве. Особенно важно, чтобы не затенялась ее вертикальная часть. Стальные тросы, крепящие мачты, должны быть разбиты на участки длиной не более 8 *м* и отделены друг от друга изоляторами.

Подобная антенна обладает значительно бо́льшим к. п. д., чем вертикальная заземленная антенна.

Эффективность вертикальных антенн с горизонтальной частью можно еще больше улучшить, уменьшив излучение

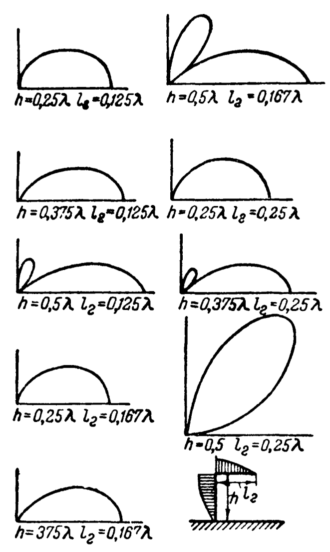


Фиг. 73. Антенны с неизлучающей горизонтальной частью.
а — антенны с согнутой горизонтальной частью; *б* — зонтичная антенна.

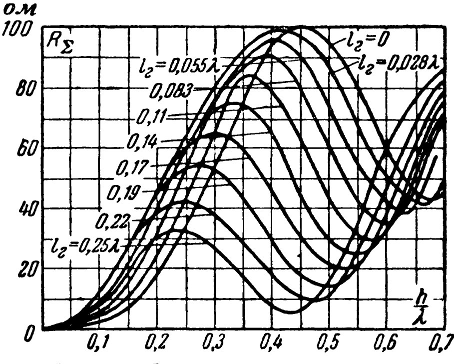
горизонтальной части. Это достигается тем, что ее провод сгибается так, чтобы образовались близкие участки с противоположным направлением тока. На фиг. 73,*а* приведены различные варианты выполнения неизлучающих вершин антенн промежуточных волн. Чем больше взять согнутых секций, тем меньше окажется разница в величине тока в них

и тем меньше они будут излучать. При этом одновременно сокращается протяженность горизонтальной части антенны.

Для улучшения распределения тока в вертикальной части антенны на ее конце можно создать сосредоточенную емкость. На верхнем конце антенны на легкой деревянной раме радиально, в виде круглого зонта, натягиваются провода и скрепляются на концах по окружности толстой проволокой (фиг. 73,*б*). Размеры зонта сравнительно не велики. Применение такой системы часто весьма удобно, так как она требует установки всего одной мачты. Однако антенна с сосредоточенной емкостью много критичнее Г-образной антенны в настройке и мало пригодна для работы в диапазоне частот.



Фиг. 74. Диаграммы направленности Г-образных антенн в вертикальной плоскости.



Фиг. 75. Сопротивление излучения Г-образных антенн.

Характеристики излучения всех приведенных выше антенн почти не отличаются от характеристик вертикальных заземленных антенн, имеющих такую же высоту. На фиг. 74 приведены диаграммы направленности Г-образных антенн с различной вертикальной и горизонтальной частью.

На фиг. 75 приведен график изменения сопротивления излучения Г-образных антенн различной высоты при различной длине горизонтальной части. Пользуясь этим графиком, можно подобрать наивыгоднейшее соотношение размеров вертикальной и горизонтальной частей и рассчитать входное сопротивление, токи и напряжения в антенне. Если полученные в результате расчета I_A и U_A будут значи-

тельно превышать истинные величины токов и напряжений в антенне, то это послужит указанием на плохое качество заземления. Коэффициент полезного действия хорошей антенны промежуточных волн (вместе с цепью настройки) составляет около 60—70%.

При работе в городских условиях часто возникают серьезные трудности с размещением антенн. В этом случае приходится вносить некоторые изменения в конструкцию описанных выше антенн или использовать другие системы. Однако следует иметь в виду, что эти антенны будут обладать худшими свойствами, чем основные антенны.

Первым типом такой антенны является наклонный провод. Наклонный провод обладает значительным излучением под углами, близкими к вертикали. Поэтому применение его целесообразно для установления ближней связи на расстоянии до 200 *км*.

По мере увеличения наклона провода излучение вдоль земли уменьшается, а под углами, близкими к вертикали, возрастает. При углах наклона, бóльших 45° к земле, антенна хорошо излучает как вдоль земли, так и под большими углами к горизонту.

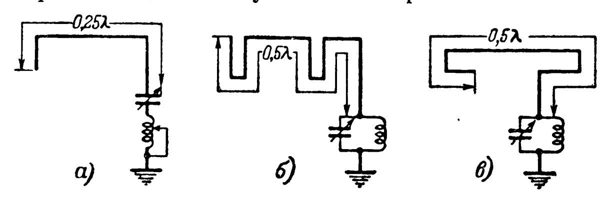
Характеристика направленности наклонного провода в горизонтальной плоскости имеет вид эллипса. Сопротивление излучения провода, наклоненного под углом, бóльшим 45° к земле, практически не отличается от сопротивления излучения вертикального вибратора.

Желательно, чтобы длина наклонного провода равнялась четверти волны, что для средней волны 160-метрового любительского диапазона с учетом укорочения составит 39,5 *м*, при половине волны (79 *м*). В первом случае настройка должна осуществляться по последовательной, а во втором — по параллельной схеме. Параметры элементов настройки следует брать того же порядка, как и в случае Г-образных антенн.

В городских условиях можно также рекомендовать использовать согнутые Г-образные антенны. Поскольку в городе обычно нет возможности устроить хорошее заземление, то желательно применять антенны длиной в половину волны. Изгибать провод антенны следует так, чтобы возможно меньше ухудшить ее излучающие свойства. Если вертикальная часть антенны закрыта окружающими строениями, а горизонтальная поднята достаточно высоко (например, между крышами двух домов), более выгодно использовать ее излучение. В этом случае рационально изгибать конец

горизонтальной части там, где амплитуда тока минимальна (фиг. 76,*а*). Изгибы необходимо производить под возможно бо́льшими углами. В крайнем случае допускаются изгибы под прямым углом; изгибать провод антенны под острыми углами не следует.

Можно производить изгибы, образуя при этом петли (фиг. 76,*б*). Однако тогда излучение изогнутой части практически уничтожается. Иногда бывает удобно изгибать вертикальную часть антенны. Если это сделать так, как показано на фиг. 76,*в*, то излучение ее при этом не изменится.



Фиг. 76. Согнутые Г-образные антенны.

В самых неблагоприятных случаях приходится производить несколько изгибов.

Во всех этих системах очень важно тщательно выполнять заземление. Провод до заземления должен быть возможно короче. Если его длина окажется соизмеримой с длиной волны, то он будет интенсивно излучать. Поскольку обычно заземляющий провод проходит низко вдоль стен или внутри помещения, то его излучение будет поглощено окружающими предметами, т. е. создаст бесполезные потери энергии и ухудшит к. п. д. антенны.

24. Устройство заземлений и противовесов

Основные потери у несимметричных антенн любых типов сосредоточиваются в переходных сопротивлениях заземления и в земле около основания антенны. Для того чтобы по возможности уменьшить эти потери, принимают специальные меры для улучшения проводимости земли и уменьшения переходного сопротивления в месте соединения антенны с землей.

Переходное сопротивление будет тем меньше, чем больше поверхность соприкосновения конца антенны с землей. Поэтому часто заземленный конец антенны выполняют в виде большого металлического листа или широкой водопроводной трубы, которые закапывают до уровня грунтовых вод.

В некоторых случаях искусственно улучшают влагозадерживающие свойства почвы. Для этого около заземляющего конца насыпают древесный уголь, кокс или глину.

Заземляющий лист зарывают на глубину около 2 *м* в яму, заполненную землей, смешанной с углем, поваренной солью или медным купоросом. Засыпку ямы производят слоями, которые смачиваются при этом водой. Сверху яма засыпается слоем земли толщиной 30—50 *см*. Обновление состава заполнителя ямы следует производить не реже чем раз в 2 года.

Заземляющий лист или труба должны быть очищены от краски, ржавчины или окалины. Хорошо, если их поверхность будет оцинкована или омеднена. Соединение антенного провода с заземлителем лучше всего производить с помощью сварки. Пайка довольно быстро разрушается в естественных условиях, поэтому если соединение сделано на пайке, контакт должен поддерживаться дополнительно с помощью плотных хомутов, надеваемых сверху. Кроме того, желательно залить место спайки каким-нибудь некоррозирующим составом, например, асфальтовым лаком.

Значительно лучше заземление, выполненное в виде системы радиально расходящихся проводов длиною в полволны, закопанных на глубину 30—50 *см*. Даже при длине проводов около 0,1 λ получаются вполне удовлетворительные результаты. Провода заземления должны быть голые медные диаметром 1—2 *мм*. Чем больше их,— тем лучше, но достаточно хорошее заземление получается уже при 10—12 проводах. Рекомендуется соединять провода несколькими поперечными перемычками.

Часто в городских условиях невозможно устроить настоящее заземление. Тогда присоединяют «земляной конец» к водопроводным трубам. Качество такого «заземления» редко бывает хорошим. Если все же обстоятельства заставляют пользоваться им, то соединение всегда следует производить не с трубами отопительной системы, а с водопроводными или канализационными трубами, так как они обычно достигают земли по наиболее короткому пути. Ни в коем случае нельзя производить заземление с помощью труб газовой системы, так как они покрываются толстым слоем асфальта и не имеют хорошего электрического контакта с землей.

В тех случаях, когда устроить хорошее заземление невозможно, целесообразно заменить его противовесом.

Противовес представляет собой разветвленную систему проводов, устанавливаемую под антенной, с которой соединяется второй выходной зажим генератора.

Размеры противовеса должны составлять примерно 0,3—0,5 λ. Число проводов и характер их расположения также могут быть различными. Хорошие результаты дают противовесы, выполненные в виде системы радиально расходящихся проводов, соединенных для исключения резонансных явлений через некоторые интервалы поперечными перемычками. Отрезки проводов между перемычками не следует делать больше 3—5 *м* в больших противовесах и 1,5—3 *м* в малых.

Высота противовеса над землей не является критичной и может выбираться в пределах от 1,5 до 3 *м*. Необходимо помнить, что эффективная высота антенны отсчитывается от противовеса.

В некоторых случаях удовлетворительные результаты получаются, когда на землю просто кладется металлический лист или система проводов. Такое устройство просто и удобно, но, как правило, оно работает хуже, чем поднятый противовес.

При расположении антенны над металлической крышей или над другим большим металлическим предметом они могут быть с успехом использованы в качестве противовесов. При этом параметры цепи настройки для каждого частного случая получаются различными и их приходится подбирать экспериментально.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

АНТЕННЫ КОРОТКИХ ВОЛН

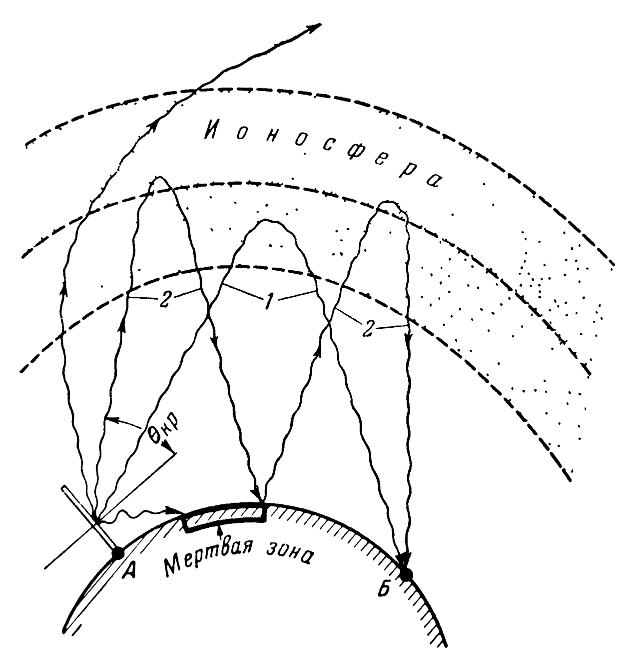
25. Особенности распространения коротких волн

Для коротких волн, к которым относятся волны длиной от 100 до 10 *м*, земля представляет собой плохо проводящую среду. Поэтому земной луч испытывает весьма сильное поглощение и на расстояниях порядка десятков километров от радиостанции он затухает настолько сильно, что связь становится невозможной даже при весьма значительной мощности передатчика.

Наоборот, поглощение коротких волн в ионосфере невелико. Поэтому интенсивность отраженных от нее пространственных лучей оказывается весьма высокой. Благодаря

этому вся дальняя связь на коротких волнах осуществляется с помощью пространственных лучей.

Малое поглощение пространственного луча в ионосфере и явление многократных отражений позволяют осуществлять связь короткими волнами на расстояния многих тысяч километров при мощности передатчика порядка нескольких десятков ватт.



Фиг. 77. Распространение коротких волн.

Осуществление связи на коротких волнах с помощью пространственных лучей имеет и свои недостатки. Например, в некоторые отдаленные точки (точка *Б* на фиг. 77) могут прийти одновременно две или более волны по различным путям. Волна *1* (фиг. 77) проходит после однократного отражения от ионосферы; волна *2*, излученная антенной под бо̀льшим углом к горизонту, — после двукратного отражения от ионосферы. Эти волны в общем случае будут обладать некоторой разностью хода и, складываясь, могут либо усиливать, либо ослаблять друг друга.

Длина пути каждой волны зависит от высоты отражающих слоев, которая непрерывно изменяется. Поэтому в точке

приема разность хода лучей также все время меняется и сила сигнала то нарастает, то убывает. Это явление носит название *дальнего замирания.*

Борьба с замираниями осуществляется введением в приемнике автоматической регулировки усиления, а также путем приема на разнесенные антенны.

Вторым недостатком связи на коротких волнах является зависимость условий распространения от интенсивности солнечной деятельности, определяющей в основном состояние ионосферы. Вследствие этого условия распространения изменяются в течение суток, в зависимости от времени года и от величины солнечной радиации, периодически увеличивающейся и уменьшающейся в течение 11 лет. Это приводит к неустойчивости связи и вынуждает часто изменять рабочую волну передатчика.

Величина критического угла для волн этого диапазона зависит от состояния ионосферы и длины волны. Средние значения критического угла для различных волн приведены в табл. 2.

Таблица 2

Длина волны, *м*	10	20	30	40	60	70
Критический угол по отношению к поверхности земли, градусы	0	13	22	32	56	79

Из табл. 2 видно, что на очень коротких волнах даже лучи, падающие на иносферу под скользящими углами, не отражаются ею.

Наличие критического угла и сильное поглощение земного луча создает около радиостанции «мертвую зону», где прием невозможен.

Напряженность поля в месте приема будет, как правило, выше, если оно создается лучом, испытавшим однократное отражение от ионосферы. Поэтому для перекрытия максимального расстояния с помощью однократно отраженного луча необходимо, чтобы антенна излучала энергию под низкими углами к горизонту (порядка 10—20°). Излучение же под бо́льшими углами, необходимое для установления связи на ближние расстояния, может быть во много раз менее интенсивным.

Таким образом, исходя из условий распространения коротких волн, мы приходим к вполне определенным требо-

ваниям к виду характеристики излучения антенных систем, что дает возможность производить оценку качества различных излучателей.

26. Слабонаправленные антенные системы

Вопрос о поляризации излучения в диапазоне коротких волн не играет существенной роли, так как при отражении от ионосферы пространственные волны часто изменяют свою поляризацию. Вследствие этого для связи на коротких волнах возможно использование как вертикальных, так и горизонтальных излучателей.

Наиболее простой антенной системой является вертикальный несимметричный вибратор.

Несимметричный заземленный вибратор. Несимметричный вибратор весьма удобен, так как имеет малые размеры, прост в настройке и обладает благоприятной для дальней связи характеристикой излучения. Особенно удобно его применять в тех случаях, когда антенна может питаться от передатчика непосредственно без фидера.

Как было видно из § 17 (фиг. 62), проводимость почвы сильно влияет на характеристику излучения вертикальной антенны, причем при плохой проводимости прекращается излучение под малыми углами к горизонту и уменьшается величина результирующего поля по другим направлениям. Это неблагоприятно сказывается на осуществлении дальней связи. Поэтому несимметричные заземленные антенны целесообразно устанавливать, когда радиостанция расположена на морском берегу или около других водных поверхностей. Несколько худшие результаты получаются, если в непосредственной близости от антенны залегают сырые известковые почвы, глинистые или глиноземные. Самыми неблагоприятными почвами являются сухие каменистые породы и песок.

Для осуществления дальних связей наилучшим является несимметричный вибратор длиной в полволны, так как по сравнению с антеннами другой длины он имеет максимальное излучение в направлениях, близких к горизонту, и не имеет дополнительных лепестков. При ограниченных возможностях сооружения мачты антенны можно использовать и более короткие вибраторы. Возможно также использование Г-образных антенн, рассмотренных ранее.

На коротких волнах также может использоваться наклонный провод.

Симметричные вертикальные антенны. Конструктивная сложность и получающаяся часто малая эффективность заземлений и противовесов в значительной степени снижают ценность несимметричных антенн с заземленным основанием. Поэтому в диапазоне коротких волн, где вопрос о размерах антенного устройства не является столь острым, оказывается подчас более рациональным применять симметричные вертикальные антенны.

Наилучшей для дальних связей симметричной антенной является полуволновый вибратор, так как антенны большей длины имеют менее благоприятные многолепестковые характеристики направленности.

Сравнение характеристик направленности полуволнового вибратора на различной высоте (фиг. 60) показывает, что с увеличением высоты излучение под малыми углами возрастает, но одновременно появляется излучение под большими углами к горизонту. С ростом высоты оно быстро увеличивается, поэтому нерационально поднимать антенну больше, чем на $h = 0{,}25\ \lambda$ над землей.

Однако, как и вертикальные несимметричные антенны, вертикальные симметричные антенны хорошо работают лишь при установке их на берегу большой водной поверхности, на сырых и болотистых почвах. В других условиях они могут давать весьма посредственные результаты.

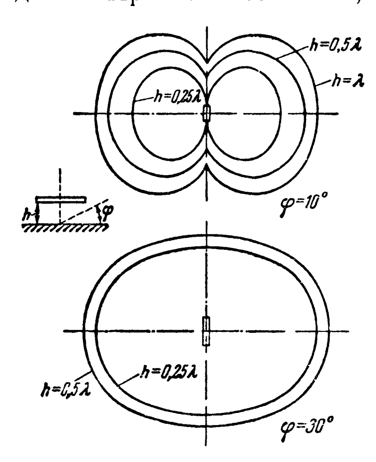
Вертикальные симметричные антенны обладают довольно значительными размерами и требуют для установки высокой мачты. Кроме того, антенны обычно не удается устанавливать в открытом месте и некоторая часть излучателя всегда затеняется окружающими строениями, что приводит к значительным потерям энергии.

В силу перечисленных выше причин на коротких волнах чаще используются горизонтальные антенны, которые нетрудно поднять на достаточную высоту, чтобы получить хорошие излучающие свойства и вынести антенну из затененного пространства.

Горизонтальный полуволновый вибратор. Горизонтальный полуволновый вибратор является самой распространенной из слабонаправленных коротковолновых антенн. Одним из преимуществ горизонтального полуволнового вибратора является то, что проводимость почвы почти не влияет на характеристику его излучения.

Рассмотрение зависимости характеристик излучения горизонтального вибратора от высоты подъема (фиг. 57) показывает, что наиболее выгодной для установления даль-

них связей является высота подъема $h = \lambda$. Однако при такой высоте существует весьма значительное излучение под большими углами к горизонту. Меньшим излучением под большими углами обладает антенна, поднятая на высоту $h = 0{,}5\ \lambda$. В этом случае основная доля энергии излучается под относительно низкими углами, однако излучение под углами 10—20° получается менее интенсивным, чем в первом случае. Поэтому обычно идут на компромисс, и высоту подвеса горизонтальной антенны выбирают в пределах от 0,5 λ до λ. При высоте $h = 0{,}75\ \lambda$ характеристика излучения в одинаковой степени благоприятна как для дальней, так и для ближней связи.



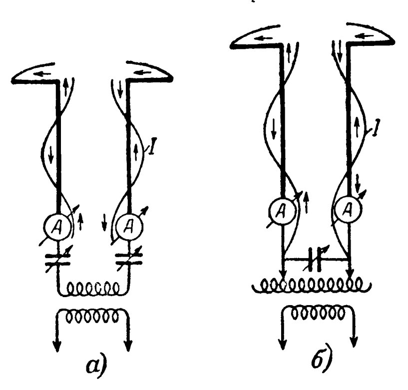
Фиг. 78. Диаграмма направленности горизонтального вибратора в горизонтальной плоскости при различной высоте подвеса над землей и под различными углами к горизонту.

Характеристика излучения вибратора в горизонтальной плоскости (фиг. 78) отличается значительной неравномерностью. Из сравнения характеристик излучения под различными углами к горизонту следует, что эта неравномерность проявляется особенно резко под низкими углами к горизонту. Поэтому для дальней связи необходимо устанавливать антенну так, чтобы максимумы диаграммы направленности ложились на направления наиболее важных или вероятных линий связи. Из приводимой диаграммы также видно, что с увеличением высоты подвеса неравномерность излучения в горизонтальной плоскости сглаживается.

Существует несколько способов питания полуволновых вибраторов: в центре или с конца двухпроводным фидером, работающим в режиме стоячих волн, или с помощью двухпроводного или однопроводного фидера, работающего в режиме бегущей волны.

Полуволновый вибратор, питающийся в центре с помощью двухпроводного фидера, работающего в режиме стоячих волн. Входное сопротивление настроенного полуволнового вибратора равно 73,1 *ом*. Если непосредственно присоединить к нему двухпроводный воздушный фидер, обладающий волновым сопротивлением порядка нескольких сот

ом, то они окажутся сильно рассогласованными, и в фидере возникнут как бегущие, так и стоячие волны, причем коэффициент бегущей волны будет очень мал. В результате к. п. д. фидера окажется относительно низким, а амплитуды тока и напряжения в отдельных его точках будут приблизительно в 1,5—1,8 раза превышать напряжение и ток при работе фидера в режиме бегущей волны. Несмотря на эти серьезные недостатки, подобный способ питания часто применяется в силу своей простоты и возможности диапазонной работы.



Фиг. 79. Питание горизонтального вибратора фидером со стоячими волнами.

а—последовательная настройка антенны; *б* — параллельная настройка антенны.

Если в фидере укладывается четное число четвертей волн, то на его конце у генератора находится узел напряжения и пучность тока, и входное сопротивление антенно-фидерной системы невелико. В этом случае необходимо применить последовательную схему настройки (фиг. 79,*а*). Чтобы не нарушать симметрии фидера, настраивающие конденсаторы включаются в оба провода. При резонансной длине всей системы роль их заключается в компенсации реактивного сопротивления катушки связи. При работе с расстроенной системой они компенсируют реактивную составляющую входного сопротивления нагруженного фидера.

Когда в фидере укладывается нечетное число четвертей волн, то у его начала образуется узел тока и пучность напряжения, и входное сопротивление оказывается очень большим. В этом случае следует применять параллельную настройку (фиг. 79,*б*).

Если длина фидера такова, что в нем не укладывается целое число четвертей волн, то, когда узел тока находится на расстоянии меньшем чем $0{,}125\,\lambda$ от начала линии, следует применять параллельную настройку (в противном случае — последовательную).

Во избежание значительных потерь желательно, чтобы длина фидерной линии не превышала $0{,}5\,\lambda \div 1\,\lambda$.

При установке антенны следует тщательно следить за сохранением симметрии всей системы, — иначе фидер будет сильно излучать, потери возрастут, и диаграмма направленности антенны будет искажена. Первым признаком нарушения электрической симметрии, которое может произойти вследствие либо неодинаковой длины половин антенны, либо близости посторонних предметов к одной из них, — является различие в показаниях антенных приборов. Изменением длины одной из половин антенны следует добиться равенства и симметричного расположения стоячих волн в проводах фидера.

При последовательной настройке катушка связи должна содержать несколько витков такого же провода, что и катушка анодного контура выходного каскада. Емкости конденсаторов должны составлять около 250—350 *пф* для диапазонов 1,75, 3,5 и 7 *мггц* и около 100 *пф* для диапазонов 14 и 28 *мггц*.

При параллельной настройке антенный контур может иметь такие же параметры, как и контур выходного каскада передатчика.

Полуволновый вибратор, питаемый с конца двухпроводной воздушной линией в режиме стоячих волн. На концах полуволнового вибратора находятся узлы тока и пучности напряжения. Такие же условия создаются и на концах разомкнутого фидера. Поэтому можно, не нарушая распределения тока в фидере, присоединить один из его концов к концу полуволновой антенны, оставляя второй свободный (фиг. 80).

Строго говоря, вследствие излучения входное сопротивление вибратора не будет равно бесконечности, в фидере возникнет некоторая асимметрия и небольшое излучение его всегда будет существовать.

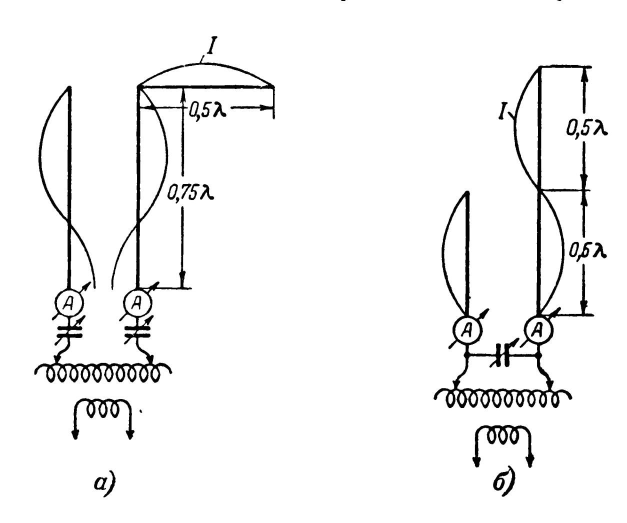
Такой способ питания антенны несколько хуже питания антенн двухпроводным фидером в центре. Однако в ряде случаев подключение фидера к центру вибратора оказывается затруднительным. Поэтому такие антенны получили довольно широкое распространение на маломощных радиостанциях.

Заметим, что вполне возможно и вертикальное расположение излучателя, как показано на фиг. 80,*б*.

Фидер для питания антенны с конца выполняется из такого же провода, из которого сделан излучатель. Расстояние между проводами устанавливается в пределах 15—

30 *см*. Провода скрепляются изоляторами через интервалы в 1 *м*.

Длину фидера рекомендуется подбирать так, чтобы в нем укладывалось нечетное число четвертей волн и можно было бы применить последовательную настройку. Поскольку потери в фидере в режиме стоячих волн велики, нужно стремиться по возможности сокращать его длину.



Фиг. 80. Антенны, питающиеся двухпроводным фидером с конца.

а — последовательная настройка горизонтальной антенны; *б* — параллельная настройка вертикальной антенны.

Для того чтобы распределение тока в фидере было симметричным, антенна должна быть точно настроена в резонанс. Порядок настройки системы следующий:

1. Отсоединяют излучатель и, слабо связав генератор с фидером, изменяют одновременно и в одинаковой степени емкости конденсаторов, включенных последовательно в провода фидера, добиваясь максимального отклонения стрелок приборов. Замечают деление шкал конденсаторов.

2. Присоединяют антенну. Показания приборов при этом резко уменьшаются, так как в систему вносится значительное затухание за счет излучения энергии антенной. Поскольку первая регулировка производилась при очень слабой связи с передатчиком, то для проведения дальнейшей настройки может оказаться необходимым увеличить связь.

3. Изменяя емкость конденсаторов в ту или другую сторону, устанавливают в системе снова резонанс. Если при этом емкость конденсаторов окажется прежней, это будет означать, что антенна точно настроена в резонанс, и ее присоединение не внесло никакой расстройки в фидерную линию. Если же емкость конденсаторов придется уменьшить, то это будет означать, что излучатель имеет длину больше резонансной и его нужно укоротить, а если емкость конденсаторов придется увеличить, то нужно удлинить антенну.

После установления резонансной длины излучателя и настройки всей системы в резонанс увеличивают связь до получения максимального тока в антенне.

Симметричное питание полуволнового вибратора двухпроводным фидером, работающим в режиме бегущей волны. В случае питания антенны с помощью фидерной линии, в которой установилась бегущая волна, потери в ней значительно уменьшаются и снижаются требования к изоляции.

Идеальным случаем является непосредственное согласование фидера с антенной. Поскольку входное сопротивление полуволнового вибратора, питаемого в середине, при принятых пределах изменения высоты подвеса от 0,5 λ до λ колеблется обычно в пределах от 60 до 80 *ом* (см. фиг. 61), то для непосредственного согласования необходимо использовать низкоомные фидеры. Наилучшими из них являются двухпроводные линии, заваренные в специальный диэлектрик.

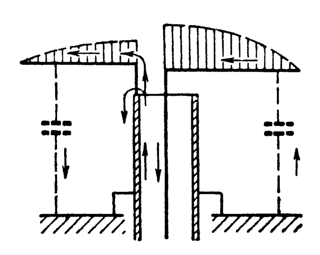
Концентрический кабель обладает волновым сопротивлением того же порядка, что и входное сопротивление антенны, но вследствие того, что он несимметричен, для согласования его с антенной приходится применять дополнительные приспособления.

Дело в том, что его внешняя оплетка соединяется с землей. Поэтому при соединении с симметричной антенной нарушается равенство емкостей обеих половин вибратора по отношению к земле. Если до точки присоединения токи, текущие по внешней и внутренней жиле были равны, то токи в обеих половинах вибратора будут различны, и по наружной стороне внешней оплетки потечет выравнивающий ток. Он создаст значительное внешнее поле излучения, исказит характеристику направленности антенны и увеличит потери энергии (фиг. 81).

Поэтому коаксиальные фидеры редко когда применяются для питания симметричных вибраторов. В тех случаях, когда они все же находят применение, следует рекомендовать попытаться улучшить условия работы фидера путем неко-

торого увеличения длины половины вибратора, соединенной с внутренней жилой, и такого же уменьшения длины другой половины.

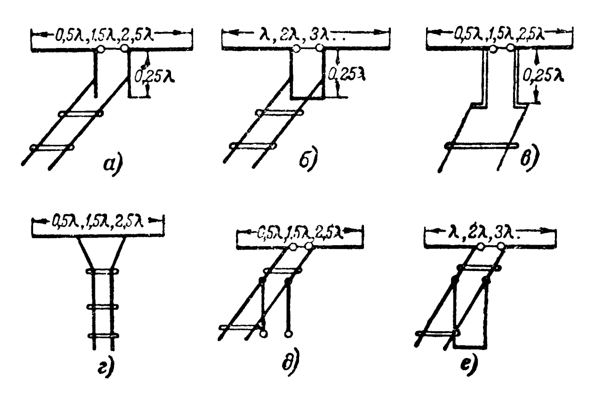
Для приемных антенн часто используется фидер из свитых проводов в резиновой, полихлорвиниловой или иной изолирующей оболочке. Такой фидер очень хорошо согласуется с полуволновой антенной и удобен для монтажа, однако он обладает большими потерями и поэтому практически не применяется на передающих радиостанциях.



Фиг. 81. Соединение симметричного вибратора с несимметричным кабелем.

Значительно большее распространение получило питание симметричных вибраторов с помощью открытых двухпроводных линий при согласовании их различными трансформаторами сопротивлений (фиг. 82), описанными в § 11.

При согласовании антенн, работающих на нечетных гармониках, с помощью резонансного трансформатора (фиг. 82,а) входное сопротивление антенны должно быть довольно сильно повышено, поэтому используется разомкнутая четвертьволновая линия. Коэффициент трансформации

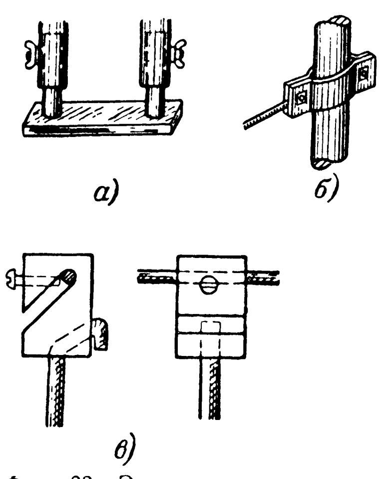


Фиг. 82. Согласование двухпроводного фидера с симметричными антеннами.

а и *б* — резонансные трансформаторы для согласования с антеннами, работающими на нечетных и четных гармониках; *в* — четвертьволновый трансформатор для согласования с антенной, работающей на нечетных гармониках; *г* — согласование с помощью расходящейся линии; *д* и *е* — согласование с помощью реактивных шлейфов при работе антенны на нечетных и четных гармониках.

получается обычно больше четырех, поэтому согласования можно достичь весьма точно. Метод настройки такого антенно-фидерного устройства был подробно рассмотрен в гл. 1.

Задачей всякого согласования является по сути дела получение одинакового отношения напряжения к току в нагрузке и питающем устройстве в точках их соединения. Вследствие различного характера распределения стоячих волн тока и напряжения в антенне это отношение в различных точках антенны будет неодинаковым. В центре оно будет минимальным; к концам оно будет возрастать, стремясь к бесконечности.



Фиг. 83. Элементы конструкции согласующих трансформаторов.

а — подвижная перемычка для настройки резонансного трансформатора; *б* — соединение фидера с трансформатором; *в* — подвижное соединение антенны с расходящейся линией.

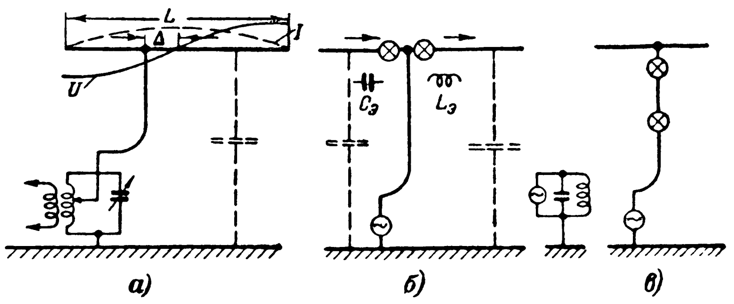
Если отношение напряжения к току в режиме бегущей волны в фидере больше входного сопротивления антенны в центре, то на ней всегда найдутся точки, в которых отношение напряжения к току (входное сопротивление) окажется точно равным волновому сопротивлению фидера. Если присоединить его к этим точкам, то согласование фидера с антенной будет достигнуто.

Этот способ согласования, при котором сам вибратор используется в качестве согласующего трансформатора, широко используется на практике (фиг. 82,*г*). Такое согласование можно использовать при питании симметричных антенн, работающих на нечетных гармониках, поскольку их входное сопротивление в центре меньше волнового сопротивления воздушного фидера.

Для того чтобы иметь возможность производить точную регулировку согласования, концы фидера следует делать подвижными. Это можно осуществить с помощью несложной конструкции, изображенной на фиг. 83. На этой же фигуре изображены некоторые конструктивные детали согласующих трансформаторов.

При регулировке всей системы нужно в первую очередь настроить вибратор, и только потом находить точки согласования. Если вибратор настроен не точно, то его входное сопротивление всегда будет содержать реактивную составляющую и при любом подключении фидера чисто бегущей волны получить не удается. Настройка излучателя и контроль за работой фидера осуществляются теми же способами, какие применялись при настройке описанных выше антенн.

Точное согласование в такой антенне достигается только на одной волне. Настройка антенны не очень критична, поэтому, если настроить ее на среднюю волну любитель-



Фиг. 84. Антенна, питающаяся однопроводным фидером с бегущей волной.

а — схема питания антенны; *б* — схема настройки излучателя; *в* — способ определения согласования антенны с фидером.

ского диапазона, то она будет вполне удовлетворительно работать во всем диапазоне.

Полуволновый вибратор, питающийся однопроводным фидером в режиме бегущей волны. Волновое сопротивление одиночного провода имеет величину порядка 500 *ом*. Если присоединить его к полуволновому вибратору в точке, где входное сопротивление равно 500 *ом* (фиг. 84,*а*), то однопроводный фидер окажется согласованным с антенной. Второй зажим генератора присоединяется к «земле», которая образует с проводом антенны некоторую емкость. Условием хорошей работы данной системы является точное согласование антенны с фидером. Когда оно достигнуто, то бо̀льшая доля энергии передается по фидеру антенне. Если же условия согласования не выполняются, то в фидере устанавливаются стоячие волны и он начинает сильно излучать.

Настройка такой антенны значительно сложнее и критичнее, чем настройка симметричных антенн. Трудность

здесь заключается в том, что невозможно дать определенных, справедливых для любых случаев рекомендаций относительно положения точки присоединения фидера. Поскольку фактически второй половиной антенны является земля, то условия работы всей системы в сильной степени зависят от конкретных свойств земли. Вследствие этого параметры антенны сильно изменяются в зависимости от смены климатических условий.

На излучающие свойства антенны, кроме того, влияет относительная высота подвеса, длина рабочей волны и наличие вблизи посторонних предметов.

Все это заставляет производить периодический контроль режима работы антенны. Если же она хорошо отрегулирована, то может работать весьма эффективно.

Для правильной работы антенны важно, чтобы фидер не имел резких перегибов. К антенне он должен подходить под прямым углом. В противном случае антенна будет наводить в нем некоторые токи, а они создадут вторичное излучение, искажающее характеристику направленности антенны. Ближайший плавный изгиб допустим на расстоянии не менее четверти волны от антенны.

При налаживании антенной системы в первую очередь следует тщательно настроить вибратор. Для этого выбирают приблизительное место расположения ввода фидера на антенне и включают по обе стороны от него два прибора или обычные лампы накаливания (фиг. 84,*б*). Они должны включаться непосредственно у ввода и занимать как можно меньше места. Затем слабо связывают фидер с генератором и изменяют длину вибратора до тех пор, пока показания приборов или яркость горения ламп не будут одинаковы.

После установления резонансной длины вибратора он представляет для фидера чисто активную нагрузку, величина которой подбирается передвижением ввода вдоль вибратора.

Для грубой ориентировки в табл. 3 приведены параметры антенн, у которых вибратор и фидер выполнены из одинакового провода.

В табл. 3 обозначено:

d — диаметр провода; λ — длина волны; L — длина излучателя; Δ — расстояние от ввода фидера до середины излучателя.

Осуществление контроля за режимом работы фидера с помощью описанных ранее индикаторов или неоновой лампочки здесь не вполне подходит, так как, поднося их к фи-

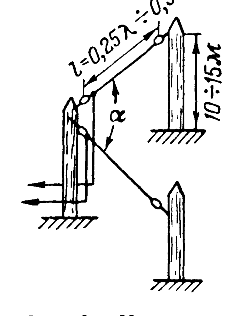
деру, можно внести сильное искажение в режим его работы за счет паразитных емкостных связей. Поэтому рекомендуется другой способ. Нужно включить один из антенных приборов в фидер непосредственно у ввода в антенну, а второй в фидер на расстоянии около четверти волны под первым. При установлении режима бегущей волны оба прибора должны показывать одинаковую величину тока. Если нет подходящих приборов, то их можно заменить обычными лампами накаливания (фиг. 84,*в*).

Таблица 3

$d/\lambda \cdot 10^{-3}$	L/λ	Δ/λ.
0,076	0,475	6,6
0,095	0,470	6,1
0,123	0,465	5,4

Если после настройки антенны генератор не будет нагружаться в достаточной степени, то причину в первую очередь нужно искать в плохом качестве заземления.

Диапазонные свойства данной антенны значительно хуже, чем у антенн центрального питания. При расстройке антенны резко увеличивается излучение фидера и к. п. д. антенны падает. Однако при настройке на среднюю волну любительского диапазона можно работать с некоторым ухудшением во всем диапазоне.



Фиг. 85. Уголковая антенна Пистолькорса.

Уголковая антенна. Уголковый излучатель был впервые предложен А. А. Пистолькорсом.

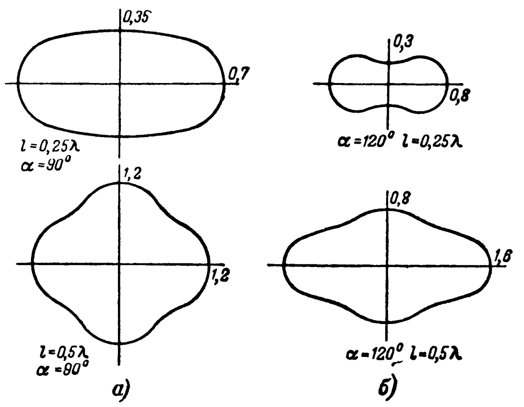
Для работы на близкие расстояния уголковая антенна подвешивается горизонтально на высоте 0,25 λ над землей, а для дальних связей — на высоте 0,5 λ. Обладая всеми преимуществами горизонтальных антенн, она обладает еще одним существенным достоинством: практически равномерным излучением в горизонтальной плоскости.

На фиг. 85 приведен общий вид антенны, а на фиг. 86 ее диаграммы направленности в горизонтальной плоскости. В вертикальной плоскости ее излучение подобно излучению горизонтальных антенн, поднятых на соответствующую высоту.

Длина излучающей части уголковой антенны обычно берется равной 0,25 λ или 0,5 λ. Размеры эти не критичны. Угол между излучателями обычно устанавливается равным

90°, но иногда его увеличивают до 120°. В последнем случае антенна приобретает некоторую направленность в горизонтальной плоскости (фиг. 86,*б*), причем максимум излучения направлен по биссектрисе угла между излучателями. Однако эффективность излучения такой системы по главному направлению меньше, чем у прямолинейного вибратора такой же длины.

Сопротивление излучения антенны при ее длине $l = 0,5\ \lambda$ и высоте $h = 0,5\ \lambda$ равно 154,8 *ом*, а при $h = 0,25\ \lambda$ — 182 *ом*. Вследствие столь значительного сопротивления



Фиг. 86. Диаграммы направленности уголковых антенн в горизонтальной плоскости.

излучения достаточно хорошие результаты получаются даже при питании антенны несогласованным высокоомным фидером. При $l = 0,25\ \lambda$ сопротивление излучения составляет около 62—64 *ом*.

27. Антенны для работы в нескольких диапазонах

Создавать несколько антенн для работы на различных волнах в любительских условиях редко представляется возможным. Кроме того, это неудобно в силу неизбежного сильного взаимного воздействия антенн друг на друга. В связи с тем, что любительские диапазоны кратны один другому, антенна, разонансная на волне наиболее длинноволнового диапазона, окажется резонансной и для волн более коротковолновых диапазонов.

Однако следует иметь в виду, что некоторый уход от резонанса при этом все-таки происходит за счет явления

«укорочения» истинной резонансной длины по сравнению с расчетной.

Рассмотрим, какое воздействие окажет оно на работу знакомых нам антенн при возбуждении их на гармониках и какие меры можно предпринять, чтобы улучшить их работу в различных диапазонах.

В § 12 мы уже говорили о том, что излучение вибратора приводит к изменению распределения напряжения вдоль его длины, в результате чего появляется реактивная составляющая индуктивного характера в его входном сопротивлении. Для ее компенсации приходится укорачивать длину вибратора по сравнению с точной длиной в целое число полуволн на 3—5%.

Поэтому резонансная длина (в метрах) симметричной антенны рассчитывается по формуле

$$L_p = \frac{150}{f}(n - 0{,}05),$$

где n — целое число полуволн (номер гармоники), укладывающихся в антенне;

f — частота, *мгц*.

Если антенна была, например, точно настроена на основную частоту, то ее длина была равна

$$L_1 = \frac{150}{f}(1 - 0{,}05) = \frac{143}{f}.$$

При работе во втором более коротковолновом диапазоне на вдвое большей частоте точная резонансная длина ее должна быть равна

$$L_2 = \frac{150}{2f}(2 - 0{,}05) = \frac{146}{f}.$$

Если сравнить эту величину с реальной длиной антенны, то легко видеть, что она примерно на 3% больше ее. Иными словами, антенна, настроенная на основную частоту, для второй гармоники окажется короче резонансной длины.

Для четвертой гармоники она будет расстроена еще больше и т. д. Расстройка эта уже весьма чувствительна и пренебречь ею нельзя.

Диапазонной в полном смысле этого слова можно называть антенну, которая в пределах заданного диапазона волн не изменяет существенно как своих энергетических показателей, так и свою диаграмму направленности.

Удовлетворить одновременно этим двум требованиям в широком диапазоне частот чрезвычайно трудно. В любительской практике основное значение имеет сохранение удовлетворительного к. п. д. антенны, поскольку любительские передатчики обладают весьма малой мощностью. На втором месте стоит требование сохранения достаточно интенсивного излучения по направлениям, особенно важным для установления тех или иных радиосвязей.

Вертикальный симметричный вибратор и заземленный несимметричный вибратор при работе на гармониках обладают сложной многолепестковой характеристикой излучения. С увеличением номера гармоники основные лепестки приближаются к оси вибратора, т. е. оказываются направленными под большими углами к горизонту. Поэтому для дальних связей их применять невыгодно.

Несимметричные наклонные антенны. Значительно лучшие результаты можно получить с несимметричными наклонными антеннами. Наклонный провод можно с успехом использовать на основной волне и на второй гармонике как для дальних, так и для ближних связей. При работе на высших гармониках лепестки диаграммы направленности располагаются достаточно благоприятно для установления дальних связей.

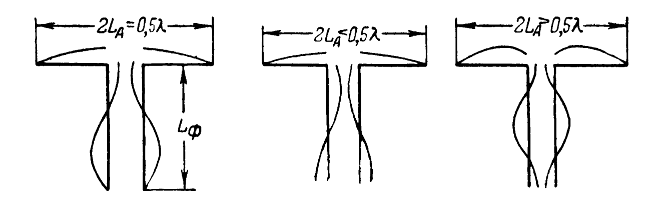
В горизонтальной плоскости направленные свойства такой антенны выражены довольно слабо. Поэтому четвертьволновую наклонную антенну, предназначенную для работы в диапазоне промежуточных волн, можно использовать на высших гармониках для осуществления дальних связей. Для того чтобы при переходе с одного диапазона на другой, расстройка, вносимая антенной, получалась минимальной, длину ее следует выбирать резонансной для среднего диапазона. В некоторых случаях ее устанавливают резонансной для наиболее употребимого диапазона.

Если применить систему длиной 39,5 *м*, то при работе на 160-метровом диапазоне придется применить последовательную настройку, а на 80-, 40-, 20-, 14- и 10-метровых диапазонах — параллельную настройку.

Симметричный горизонтальный вибратор. Рассмотрим, как изменится режим работы симметричного горизонтального вибратора при изменении длины волны. Пусть антенна питается волной больше или меньше резонансной (фиг. 87), с помощью высокоомного фидера, работающего в режиме стоячих волн. Легко видеть, что при этом симметрия и противофазность токов в проводах фидера сохранятся.

Если увеличить длину волны, то меньшая часть ее уложится в вибраторе и сопротивление излучения последнего уменьшится. Это приведет к увеличению рассогласования антенны с фидером и ухудшению его к. п. д.

При укорочении волны сопротивление излучения возрастает и рассогласование уменьшается. При изменении длины симметричного вибратора от нуля до 1,25 λ его характеристика излучения меняется мало. Однако использовать вибраторы, длина которых короче четверти волны, не рекомендуется, так как сопротивление излучения таких вибраторов слишком мало и рассогласование с фидером получается очень большим.



Фиг. 87. Отклонение рабочей волны от резонансной не нарушает режима работы фидера, питающего антенну в центре.

Практически симметричный вибратор, питаемый фидером в режиме стоячих волн, работает вполне удовлетворительно в диапазоне волн от 0,8 l до 4 l, где l — длина одного луча вибратора.

В радиолюбительской практике симметричный вибратор очень часто используется как гармониковая антенна. Если на основной волне относительная высота антенны над землей выбрана равной 0,25 λ, то на этой волне антенна будет давать хорошие результаты при связи на близкие расстояния. При работе на второй гармонике относительная высота антенны окажется равной 0,5 λ и она будет иметь диаграмму направленности, благоприятную для дальних связей.

Также благоприятной для установления дальних связей окажется характеристика излучения антенны и при работе на четвертой гармонике.

При работе на более высоких гармониках диаграмма направленности в вертикальной плоскости приобретает очень сложный многолепестковый характер, причем с ростом номера гармоники излучение в направлениях под низкими углами к горизонту неизменно возрастает.

С увеличением номера гармоники сопротивление излучения антенны возрастает и согласование с высокоомным фидером улучшается. Это является еще одним достоинством гармониковых антенн, которое проявляется как при последовательном, так и при параллельном резонансах.

Изменение положения узлов и пучностей напряжения и тока на входе питающего фидера происходит только при переходе с нечетной гармоники на четную. Поэтому при работе только на четных гармониках схема настройки не изменяется. Переход с работы на основной частоте на волны четных гармоник сопряжен с изменением способа настройки.

В табл. 4 приведены размеры и указаны способы настройки некоторых многодиапазонных симметричных антенн. Для того чтобы облегчить разработку подобных антенн, перечислим основные правила, которыми нужно при этом руководствоваться.

Данные системы представляют собой как бы резонансные антенны, средняя часть которых согнута в неизлучающий двухпроводный фидер. Условие резонанса требует, чтобы общая длина проводов, входящих в систему, содержала целое число полуволн, т. е.

$$2L_A + 2L_ф = n\frac{\lambda}{2},$$

где L_A — длина луча антенны, *м*;

$L_ф$ — длина фидерной линии, *м*.

Минимальная длина излучающей части антенны должна равняться четверти волны. Или, наоборот, максимальная применимая волна

$$\lambda_{макс} = 8L_A.$$

Если во всей системе укладывается четное число полуволн, то следует применить параллельную схему настройки, а если нечетное число полуволн — последовательную.

Чтобы выбрать наивыгоднейшую длину антенны, нужно подсчитать резонансные размеры антенны для средних волн применяемых диапазонов и выбрать некоторую среднюю величину.

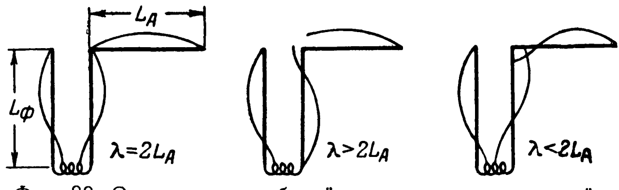
В табл. 4 буквой *А* обозначен диапазон со средней волной 157,5 *м*; *Б* — диапазон 84,6 *м*; *В* — диапазон 42,3 *м*; *Г* — диапазон 20,1 *м*; *Д* — диапазон 14,1 *м*; *Е* — диапазон 10,4 *м*.

Вибратор, питаемый с конца. При питании вибратора с конца двухпроводной линией отклонение длины рабочей

Таблица 4

$2L_A$, м	$L_ф$, м	Настройка в различных диапазонах	
		параллельная	последовательная
83,0	41,2	А, Б, В, Г, Д, Е	—
41,8	20,7	В Г, Д, Е	А, Б
30,5	11,6	В, Г, Д, Е	Б
20,6	10,4	Г, Е	Б, В, Д
15,3	13,1	Г, Е	Б, В, Д
10,1	15,6	Г, Е	Б, В, Д
10,1	9,5	Д, Е	Г

волны от резонансной вызывает существенные изменения режима работы системы. При этом узел тока уже не лежит у конца правого провода фидера (фиг. 88), в то время как



Фиг. 88. Отклонение рабочей волны от резонансной нарушает симметрию фидерной системы, питающей антенну с конца.

в левом проводе попрежнему узел тока находится на конце. Вследствие этого распределение тока в проводах получается несимметричным. Последнее приводит к резкому увеличению излучения фидера. Кроме того, с увеличением номера гармоники уменьшается входное сопротивление вибратора, что также приводит к усилению несимметрии фидерной системы. В результате увеличиваются потери, уменьшается полезное излучение горизонтальной части, падает к. п. д. антенны и изменяется ее диаграмма направленности. Для того чтобы потери на излучение фидера были минимальными, нужно стремиться всегда делать его возможно короче.

Таким образом, диапазонные свойства антенны, питаемой с конца, много хуже, чем у антенн симметричного питания.

Проектируя такую антенну, следует иметь в виду, что для того чтобы фидер имел симметричное распределение

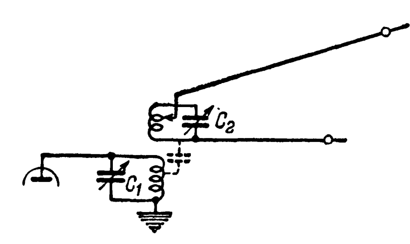
тока, нужно, чтобы во всем проводе системы (считая от начала фидера и до конца антенны) укладывалось целое число полуволн. Особое внимание следует обратить на правильный выбор компромиссной длины антенны для различных гармоник. Отклонение размеров антенны от точной резонансной длины не должно превышать нескольких процентов.

Таблица 5

$l_А$, м	$l_ф$, м	Настройки в различных диапазонах	
		параллельная	последовательная
74,0	36,6	*Б, В, Г, Д, Е*	*А*
41,6	20,4	*В, Г, Д, Е*	*Б*
40,9	20,4	*В, Г, Д*	*Б*
20,4	10,1	*Г, Д, Е*	*В*

В табл. 5 приведены данные некоторых многодиапазонных любительских антенн, питаемых с конца, и указаны методы настройки их в различных диапазонах.

Наклонная многодиапазонная антенна с противовесом. Многодиапазонные наклонные антенны в ряде случаев получаются чрезмерно длинными. Уменьшить размеры излучателя можно, свив часть его провода в катушку, используемую для связи с генератором.



Фиг. 89. Многодиапазонная наклонная антенна с противовесом.

Эквивалентное удлинение антенны, создаваемое такой катушкой, получается примерно вдвое бо́льшим, чем длина входящего в нее провода. Точная настройка достигается с помощью конденсатора переменной емкости, подключаемого последовательно или параллельно антенне.

Уменьшить длину вертикальной части антенны, сохраняя резонанс по всей системе, можно также за счет сгибания нижней части антенны и превращения ее в противовес.

На фиг. 89 изображена система, в которой использованы оба эти приема одновременно. Это позволило сделать антен-

ну весьма компактной. Если катушка связи в этой антенне окажется на расстоянии, меньшем 0,125 λ от узла тока, то нужно применять параллельную настройку, а если на большем, — то последовательную. В некоторых случаях данная система работает лучше, если, помимо индуктивной, существует и небольшая емкостная связь с генератором. Чтобы создать такую связь, нижний конец катушки связи, соединенный с противовесом, приближается к верхней части контурной катушки, находящейся под наибольшим потенциалом высокой частоты. Связь антенны с генератором удобнее всего регулировать изменением взаимной ориентации катушек. Если выходной каскад передатчика не нагружается в должной степени, то в первую очередь нужно проверить правильность выбора схемы настройки и затем, перемещая катушку связи, изменять соотношение между емкостной и индуктивной связью. Если это не приведет к желаемым результатам, следует подобрать лучшее соотношение параметров системы, изменяя длину антенны по 5—10 *см* за один раз, но в целом не больше, чем на 70—80 *см*.

Для диапазонов 7, 14, 20 и 28 *мггц* длина луча антенны должна быть равной 27,6 *м*, а длина противовеса — около 3 *м*. Емкость конденсатора C_2 должна составлять примерно 250 *пф*. Катушка связи имеет диаметр 5 *см* и выполняется из голого медного провода диаметром 1,6 *мм*; длина намотки 7—8 *см*. Для диапазона 7 *мггц* обычно требуется 7 ÷ 9 витков, 14 *мггц* — 5 ÷ 6 витков, 20 *мггц* — 4 ÷ 5 витков и 28 *мггц* — 2 ÷ 3 витка.

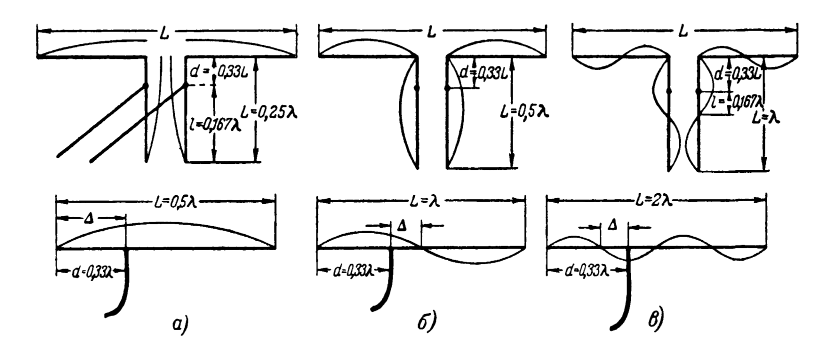
При установке несимметричных антенн на крыше здания в качестве противовеса можно использовать металлическое покрытие крыши, водяной бак или другие большие металлические предметы.

Многодиапазонная работа при питании антенн бегущей волной. Если антенна питается с помощью фидера, обладающего низким волновым сопротивлением, то при работе на четных гармониках, вследствие резкого возрастания входного сопротивления антенны фидер и антенна оказываются сильно рассогласованными. Образование стоячих волн в низкоомных фидерах, обладающих и без того большими потерями в диэлектрике, увеличивает их до недопустимой величины и создает опасность пробоя. Поэтому применение низкоомных фидеров для многодиапазонной работы практически исключено.

В тех случаях, когда согласование фидера с антенной осуществляется с помощью резонансного трансформатора,

в отдельных частных случаях удается так подобрать параметры системы, что по крайней мере на двух волнах она будет почти точно согласована. Так, при подключении питающего фидера на растоянии одной трети длины шлейфа от антенны (фиг. 90) точки включения на основной частоте, а также на второй, четвертой, восьмой и других четных гармониках будут находиться на расстоянии 0,167 λ от ближайшего узла тока.

Если бы при этом не изменялось сопротивление излучения, то входное сопротивление антенны на основной частоте и четных гармониках оставалось бы неизменным и согласование полностью сохранялось. Однако сопротивление излу-



Фиг. 90. Многодиапазонные антенны.
а — работа на основной частоте; *б* — работа на второй гармонике; *в* — работа на четвертой гармонике.

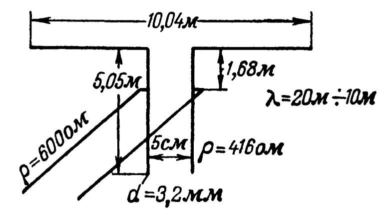
чения с увеличением номера гармоники возрастает (см. фиг. 33) и это приводит к появлению рассогласования. Почти полное согласование можно получить лишь на основной частоте и второй гармонике.

Для того чтобы при согласовании фидер был подключен на расстоянии $^1/_3$ длины шлейфа, нужно соответствующим образом подобрать волновое сопротивление питающего фидера или шлейфа. Поскольку 600-омный питающий фидер, как уже говорилось, является весьма выгодным, то лучше подбирать волновое сопротивление шлейфа. Для согласования с 600-омным фидером шлейф должен иметь волновое сопротивление 416 *ом*. Он может быть выполнен, например, из проводов диаметром 3,2 *мм*, расположенных на расстоянии 51 *мм* друг от друга. На фиг. 91 приведены размеры антенной системы для диапазонов 20 и 10 *м*. Для диапазонов

40 и 20 *м* размеры нужно удвоить (это, конечно, не относится к расстоянию между проводами трансформатора).

Согласование на гормониках при использовании в качестве трансформатора отрезка расходящейся линии (фиг. 82,*г*) нарушается, но обычно не настолько, чтобы сделать невозможной работу в различных диапазонах.

При согласовании с помощью четвертьволнового трансформатора антенна вместе с трансформатором будет образовывать резонансную систему на основной частоте и на всех четных гармониках (если не учитывать разницы в точной резонансной длине для гармоник). Благодаря этому ее входное сопротивление на четных гармониках будет иметь чисто активный характер. Однако вследствие изменения сопротивления излучения на гармониках величина трансформируемого сопротивления также будет меняться и согласование нарушится. Если согласовать систему для второй гармоники, рассогласование на четных гармониках будет невелико. Поэтому антенны с четверьтволновыми трансформаторами могут весьма успешно использоваться в различных диапазонах. Коэффициент стоячей волны получается небольшим, а к. п. д. фидера много выше, чем у антенн без трансформаторов.



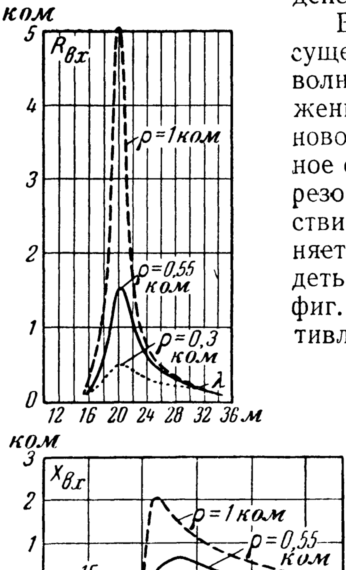
Фиг. 91. Симметричная антенна для двух любительских диапазонов.

При питании антенны однопроводным фидером, подключенным на расстоянии $1/3$ длины от одного из концов антенны (фиг. 90), он оказывается на основной частоте и всех четных гармониках, отстоящим на 0,167 λ от ближайшего узла тока. Поэтому согласование на четных гармониках сохраняется.

Для того чтобы точка согласования находилась на расстоянии $1/3$ от конца, нужно подобрать определенным образом соотношение между волновыми сопротивлениями проводов антенны и фидера. Например, если антенна сделана из провода диаметром $d = 2$ *мм* и длина ее выбрана такой, что на 20-метровом диапазоне она работает на второй или четвертой гармонике ($L_A = 23{,}4$ или 47,4 *м*), а фидер — из провода диаметром 0,9 *мм*, то точное согласование получается на 20- и 10-метровых диапазонах и удовлетворительное — на 40-метровом.

Вследствие того, что данная антенна хорошо излучает высшие гармоники, очень важно питать ее через фильтр, не пропускающий их из анодной цепи генератора.

Диполь Надененко. Весьма эффективный путь создания широкодиапазонных антенн был предложен инж. С. И. Надененко.



Фиг. 92. Входное сопротивление вибраторов с различным диаметром проводов (различным волновым сопротивлением).

Входное сопротивление антенны существенно зависит от величины ее волнового сопротивления [см. выражение (51)]. При уменьшении волнового сопротивления антенны входное сопротивление при параллельном резонансе уменьшается (59), вследствие чего по диапазону оно изменяется менее резко. Это можно видеть из графика, приведенного на фиг. 92. Снижение входного сопротивления антенны приводит к необходимости понижения и волнового сопротивления питающего фидера. Это, в свою очередь, уменьшает изменение входного сопротивления антенно-фидерной системы при работе ее в широком диапазоне частот и облегчает согласование с генератором.

Надененко показал, что при волновом сопротивлении антенны $\rho_A = 300$ *ом* и волновом сопротивлении фидера $\rho_ф = 200$ *ом* диполь длиной в 20 *м* оказывается практически согласованным с фидером в диапазоне волн от 10 до 40 *м*. Правда, диаграмма направленности сохраняется практически неизменной только на волнах от 1,56 до 4 *l*.

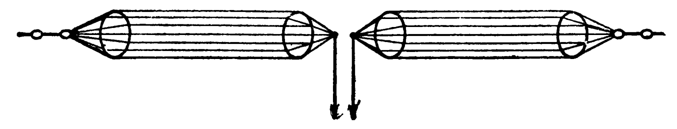
Для того чтобы волновое сопротивление антенны было близко к 300 *ом*, нужно чтобы диаметр провода излучателя был равен 0,03 λ, что для диапазона волн 40 ÷ 10 *м* составляет около 1 *м*. Выполнить такой проводник сплошным трудно, но в этом и нет необходимости. Достаточно хорошие результаты получаются, если на круглые рамки по

образующим цилиндра натянуть 4—6 проводов диаметром 2—3 *мм* (фиг. 93).

Создать низкоомный фидер с $\rho_{ф} = 200$ *ом* из двух проводов практически также трудно. Поэтому обычно применяют четырехпроводный фидер.

Часто для работы в самом длинноволновом диапазоне, где длина излучателя значительно меньше половины волны, антенну используют как Г-образную или Т-образную. Для этого провода фидера при подключении к генератору соединяют между собой, а второй зажим генератора соединяют с «землей».

В заключение подчеркнем, что основные трудности диапазонной работы определяются наличием фидерной системы и сложностью согласования ее с антенной во всем диапа-



Фиг. 93. Диполь Надененко.

зсне частот. Питание антенны с помощью высокоомной несогласованной линии является наиболее простым путем осуществления многодиапазонной работы. Сопряженные с таким способом питания большие потери и низкий к. п. д. фидера не позволяют пользоваться им в случае, если длина питающей линии превышает 3—4 λ. Монтаж такой антенной системы должен быть произведен особенно тщательно, так как при большой величине тока в проводах даже небольшое нарушение симметрии вызывает сильное излучение фидера.

28. Направленные антенны

Для установления дальних связей широко применяются направленные антенны, излучающие основную часть подводимой к ним энергии в заданном направлении. Использование таких антенн дает возможность, не ухудшая надежности действия линии связи, устанавливать на радиостанциях передатчики значительно меньшей мощности, чем те, которые применяют при работе с ненаправленными антеннами. Действительно, если, например, увеличить мощность передатчика в 4 раза, напряженность поля в месте приема возрастет всего лишь в 2 раза, а при увеличении мощности передатчика в 16 раз, — только в 4 раза и т. д.

В то же время применение относительно несложных направленных антенн позволяет увеличить напряженность поля в требуемом направлении в 10—15 раз.

Кроме того, направленные антенные системы позволяют создавать излучение под низкими углами к горизонту. Это имеет особое значение для осуществления дальних связей.

Однако применение направленных антенн имеет и свои недостатки. Размеры таких антенн, как правило, много больше, чем ненаправленных; концентрация излучения по определенным направлениям происходит за счет уменьшения излучения по другим направлениям, а следовательно, и ухудшения условий связи с корреспондентами, расположенными по этим направлениям.

Направленные антенны обладают плохими диапазонными свойствами и в большинстве случаев могут работать только на одной фиксированной волне (кроме апериодических антенн).

Существуют три основных пути создания коротковолновых направленных систем. Первый заключается в использовании направленных свойств гармониковых антенн, второй — в создании антенн, состоящих из более или менее сложных систем вибраторов, и третий — в использовании направленных излучающих свойств проводов с бегущей волной тока.

Гармониковые антенны. Рассмотрение диаграмм направленности гармониковых антенн (см. § 15) показывает, что с увеличением относительных размеров антенны все бо̀льшая и бо̀льшая часть энергии излучается в направлении, близком к ее оси. Острота главного максимума и его близость к направлению оси провода у антенн с длиной больше 2λ оказываются весьма значительной.

Поэтому длинные горизонтальные провода создают интенсивное излучение в направлениях, близких к горизонту, что благоприятно для дальней связи. Сопротивление излучения таких антенн с увеличением длины антенны возрастает.

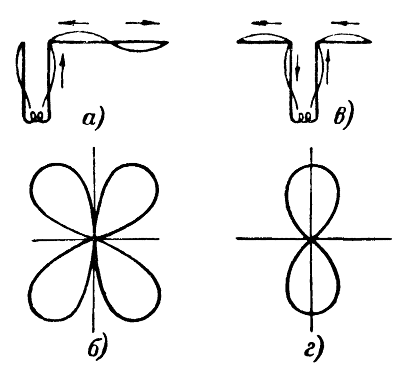
В табл. 6 приведены резонансные размеры, сопротивление излучения, угол между осью антенны и главным максимумом характеристики излучения, а также выигрыш по мощности в направлении главного максимума гармониковых антенн по сравнению с полуволновым вибратором.

Из табл. 6 видно, что̀ получение хорошей направленности требует применения антенн довольно большой длины. Это является недостатком гармониковых антенн.

Таблица 6

Число полуволн, укладывающихся в проводе	Формула для вычисления резонансной длины, f — частота, *мггц*	R_{Σ}, *ом*	Угол между главным максимумом и проводом, град.	Выигрыш в направлении главного максимума по сравнению с полуволновым диполем, *дб*
1	143/f	73	90	0
2	293/f	94	54	0,6
3	442/f	102	43	1,1
4	592/f	109	36	1,6
5	742/f	116	33	2,0
6	894/f	122	30	2,6
7	1046/f	127	28	3,0
8	1193/f	130	26	3,5
9	1342/f	134	24	3,9
10	1495/f	138	22	4,3

Большой выигрыш получить с помощью гармониковых антенн трудно. Существенным недостатком их является также то, что диаграмма направленности имеет большое количество побочных лепестков, на долю которых приходится значительная часть излучаемой мощности.



Фиг. 94. Влияние способа питания на распределение тока и диаграмму направленности антенны с длиной излучателя в одну волну.

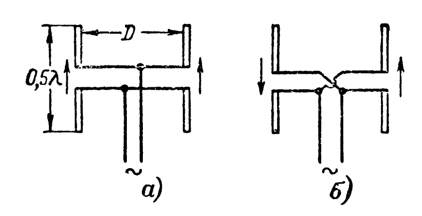
а — распределение тока в антенне при питании с конца; *б* — диаграмма направленности антенны при питании с конца; *в* — распределение тока в антенне при питании в центре, *г* — диаграмма направленности при центральном питании.

Конструктивно гармониковые антенны чрезвычайно просты. Питание их может осуществляться как в центре, так и с конца.

Следует заметить, что метод питания оказывает существенное влияние на вид характеристики направленности антенны. Например, при питании волновой антенны с конца распределение тока в проводе будет таким, как это изображено на фиг. 94,*а*, и она будет иметь характеристику излучения, приведенную на фиг. 94,*б*. Если же питать ее в центре (фиг. 94,*в*), то антенна будет иметь диаграмму направленности обычной синфазной системы из двух полуволновых вибраторов (фиг. 94,*г*).

Можно существенно улучшить характеристику излучений гармониковой антенны, согнув провод в месте расположения узлов тока (фиг. 63). Такая антенна представляет собой как бы ряд синфазных уголковых излучателей и подобно всякой синфазной системе имеет максимум излучения в направлении перпендикуляра к плоскости ее полотна. Полученная система носит название антенны Ширкеса.

Многовибраторные антенны. В диапазоне коротких волн широкое распространение получили синфазные и противофазные системы вибраторов. Конструктивно они часто почти



Фиг. 95. Синфазные и противофазные излучатели.

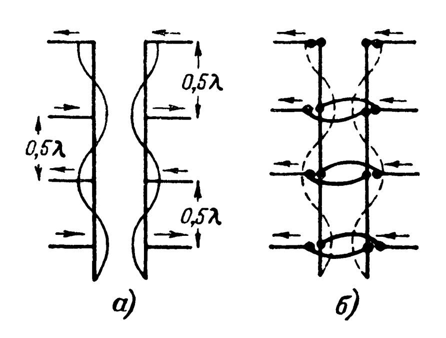
а — питание синфазных излучателей; *б* — питание противофазных излучателей.

не отличаются друг от друга. Все различие их свойств определяется разным сдвигом фаз токов в смежных вибраторах. Обычно в качестве вибраторов таких антенн используются полуволновые диполи, питаемые в центре.

Простейшая синфазная система, состоящая из двух вибраторов, показана на фиг. 95,*а*. Оба вибратора присоединяются к основному питающему фидеру посредством отрезков двухпроводной линии одинаковой длины. Вследствие этого волна тока, разветвляясь в точках присоединения линии, подходит к первому и второму вибраторам одновременно, и они питаются синфазно. Если расстояние D между вибраторами выбрать равным половине длины волны, то максимальное ослабление излучения произойдет в направлении оси системы.

Нетрудно эту же систему превратить в противофазную. Для этого достаточно перевернуть один из вибраторов на 180°. Тогда провода соединительного фидера будут перекрещиваться (фиг. 95,*б*). Фазы токов в вибраторах окажутся противоположными, и направление максимума излучения повернется на 90°.

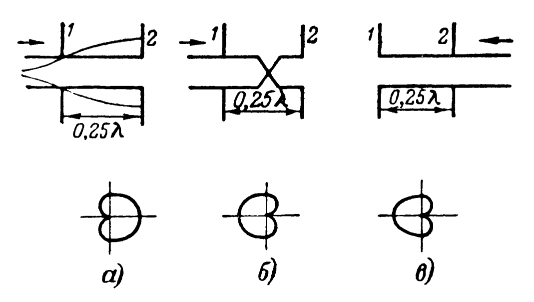
В тех случаях, когда противофазная система состоит из нескольких вибраторов, питание ее осуществляется от одного фидера. При подключении вибратора, как показано на фиг. 96,*а*, напряжения в точках присоединения смежных



Фиг. 96. Питание нескольких излучателей от одного фидера.
а — противофазная система; *б* — синфазная система.

излучателей будут отличаться по фазе на 180° и система окажется противофазной.

При образовании синфазной системы нужно подключить вибраторы так, как показано на фиг. 96,*б*. Для осуществле-

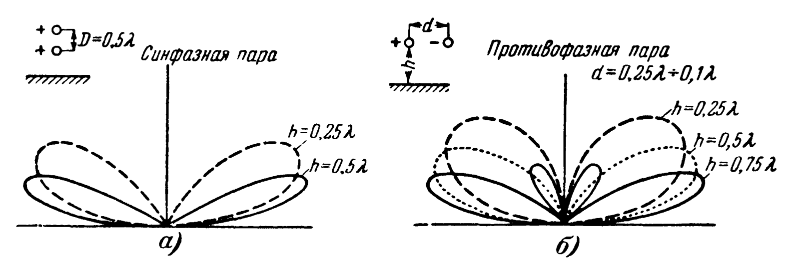


Фиг. 97. Питание вибратора с активным рефлектором.

ния синфазного питания удобнее всего перекрещивать провода фидера.

Если антенна состоит из двух вибраторов (фиг. 97) и расстояние между ними равно 0,25 λ, то волна напряжения

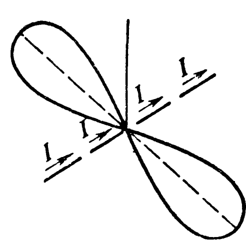
подойдет ко второму вибратору на четверть периода позже, чем к первому, и токи в них будут сдвинуты на 90°. При этом первый вибратор будет выполнять роль рефлектора и диаграмма направленности системы примет вид, показанный на фиг. 97,*а*. Если перевернуть второй вибратор на 180° или, что то же, перекрестить провода фидера, то он станет играть роль рефлектора и диаграмма направленности



Фиг. 98. Диаграммы направленности в вертикальной плоскости синфазных и противофазных пар излучателей.

антенны повернется на 180° (фиг. 97,*б*). То же самое произойдет при изменении места подключения питающего фидера (фиг. 97,*в*).

При расположении горизонтальных синфазных вибраторов один над другим происходит концентрация излучения в направлениях, близких к горизонту (фиг. 98,*а*).



Фиг. 99. Синфазные излучатели, вытянутые в одну линию.

Если синфазные вибраторы вытянуть в одну линию на одной высоте (фиг. 99), то их излучение концентрируется в узкий пучок в горизонтальной плоскости.

В противофазной системе вибраторов концентрация излучения в направлениях, близких к горизонту, получается, когда вибраторы расположены на одной высоте (фиг. 98,*б*).

На профессиональных радиостанциях применяются системы, состоящие как из горизонтальных, так и из вертикальных рядов вибраторов, которые концентрируют излученную энергию в узкий конусообразный луч. Такие антенны обычно снабжаются рефлекторами, которые уничтожают излучение в обратном направлении и уменьшают угол возвышения главного максимума.

Резонансная длина вибраторов $l_в$ (в *м*) рассчитывается по формуле

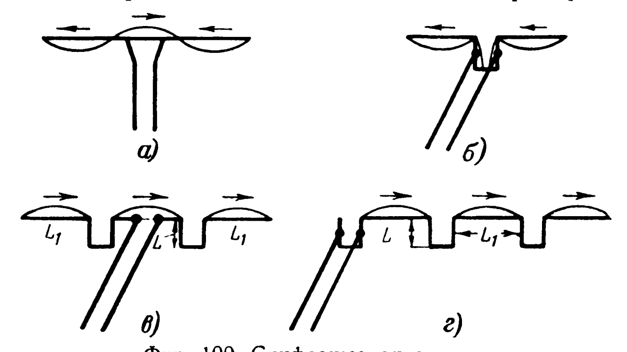
$$l_в = \frac{143}{f}.$$

Расстояние D до рефлектора определяется по формуле

$$D = \frac{75}{f}.$$

В этих формулах f — частота, *мггц*.

Любительские направленные антенны. Направленное излучение в горизонтальной плоскости проще всего создать с помощью синфазной системы линейных вибраторов. Обра-



Фиг. 100. Синфазные антенны.

а и *б* — преобразование гармониковой антенны в синфазную. *в* — питание синфазной антенны в центре; *г* — питание синфазной антенны с конца.

зовать такую систему можно, например, исключив излучение средней части гармониковой антенны (фиг. 100,*а*), где ток находится в противофазе с токами в крайних частях, согнув ее в четвертьволновый неизлучающий шлейф (фиг. 100,*б*). При этом образуется синфазная система с шлейфом, который может быть использован как согласующий трансформатор. Длина отдельных элементов такой антенны не критична; важно лишь, чтобы сохранялся резонанс всей системы.

Для сохранения условий резонанса нужно, чтобы полная длина $L_1 + 2L$ секции, состоящей из излучателя и шлейфа, содержала целое число полуволн, т. е.

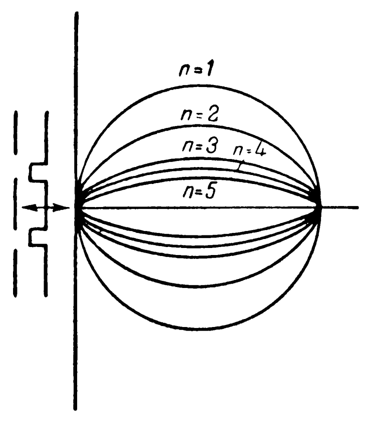
$$L_1 + L = 0{,}75\lambda = \frac{221}{f},$$

где L_1 — длина излучателя, *м*;
L — длина шлейфа, *м*;
f — частота, *мггц*.

Размеры излучателей могут изменяться в пределах от 0,375 λ до 0,625 λ.

На фиг. 100,*б* изображена двухвибраторная синфазная антенна центрального питания, а на фиг. 100,*в* — трехэлементная антенна центрального питания.

Антенну можно питать также и с конца (фиг. 100,*г*). При этом, как и у всякой несимметричной антенны, влияние неточностей в установлении резонансной длины будет сказываться сильнее, чем у антенны центрального питания.



Фиг. 101. Диаграммы направленности синфазных антенн с рефлекторами.

n — число синфазных излучателей.

Вследствие того, что сопротивление излучения многоэлементных синфазных антенн подобного типа приблизительно равно сумме сопротивлений излучений отдельных вибраторов, входное сопротивление оказывается сравнительно большим и допустимо непосредственное питание их от высокоомного фидера. При малом числе элементов для согласования антенны с фидером может быть применен один из описанных выше согласующих трансформаторов. Наиболее подходящим обычно оказывается реактивный шлейф. При питании антенны в пучности тока удобно для согласования применять четвертьволновый трансформатор.

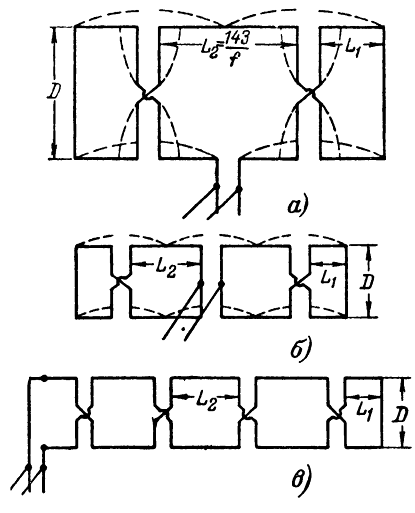
Диаграммы направленности синфазных антенн с рефлектором в горизонтальной плоскости приведены на фиг. 101. Боковые лепестки имеют незначительную интенсивность и не изображены. В случае отсутствия рефлектора такое же излучение будет иметь место и в противоположном направлении. Применение рефлектора дает добавочный выигрыш по главному направлению около 3 *дб* и некоторое обострение диаграммы направленности. Но, что еще важнее, рефлектор понижает угол возвышения главного максимума к горизонту.

Выигрыш в децибелах и ширина главного максимума для антенн с различным числом излучателей приведены в табл. 7.

Таблица 7

Число вибраторов в фазе	Ширина луча, град.	Выигрыш по сравнению с диполем, *дб*	Выигрыш синфазной антенны с рефлектором или противофазной антенны, *дб*
1	86	0	4
2	60	1,8	5
3	34	3,5	6,5
4	24	4,5	7,5
5	18	5,3	8,3

Для настройки антенной системы длина фазирующих шлейфов устанавливается несколько больше 0,25 λ, а закорачивающая перемычка делается передвижной. Окончательная корректировка длины всей системы производится по максимуму тока в приборах, включаемых в центре перемычек. Регулировка производится поочередно, начиная с самых дальних секций, считая от точек питания.



Фиг. 102. Двухэтажные синфазные антенны.

а — двухэлементная антенна; *б* — трехэлементная антенна; *в* — четырехэлементная антенна.

Синфазные антенны обладают значительно большей направленностью, чем гармониковые антенны такой же длины, и слабо выраженными боковыми лепестками в диаграмме направленности. Недостатком их по сравнению с гармониковыми антеннами является бо́льшая сложность конструкции и настройки, а также необходимость, как правило, работать на одной волне.

Двухэтажная многовибраторная антенна. Для концентрации излучения под низкими углами к горизонту можно

применять систему синфазных излучателей, расположенных друг над другом на расстоянии в полволны. Если каждый из этих излучателей будет обладать направленностью в горизонтальной плоскости, то выигрыш антенны может быть очень большим.

Простейшая двухэтажная антенна показана на фиг. 102,*а*. Нижний вибратор может питаться обычным способом через резонансный трансформатор. Верхний вибратор может питаться в тех же точках, что и нижний, присоединяясь к ним с помощью 600-омной линии.

Поскольку в любой момент времени потенциалы на концах вибраторов равны по величине и по знаку, их можно соединить перемычками. Это не имеет принципиального значения, но практика показывает, что антенна с перемычками на концах несколько менее критична в настройке и случайные изменения отдельных параметров меньше сказываются на режиме ее работы.

На фиг. 102,*а* изображена двухэтажная антенна с двумя вибраторами в каждом ряду, питаемая в центре, а на фиг. 102,*б* — двухэтажная трехэлементная антенна. На фиг. 102,*в* показана четырехэлементная антенна, питаемая с конца.

Питание вибраторов можно осуществлять как в центре, так и с конца. Концевые перемычки могут отсутствовать. С учетом укорочения вибраторов расчет размеров антенны может быть произведен по формулам

$$L_1 = \frac{71,7}{f}, \quad L_2 = \frac{143,4}{f}, \quad D = \frac{149,5}{f},$$

где L_1, L_2 и D — в *м* и f — в *мггц*.

Многовибраторные противофазные антенны. При построении противофазных антенных систем обычно используют то обстоятельство, что с уменьшением расстояния между вибраторами получается бо̀льшая направленность, чем при расстоянии в полволны (см. § 16).

С уменьшением расстояния между противофазными излучателями сопротивление излучения антенны быстро уменьшается. Однако увеличение выигрыша и излучения под низкими углами к горизонту окупает связанные с этим неудобства.

В табл. 8 приведены величины выигрыша противофазных антенн по сравнению с полуволновым вибратором в зависимости от расстояния между излучателями.

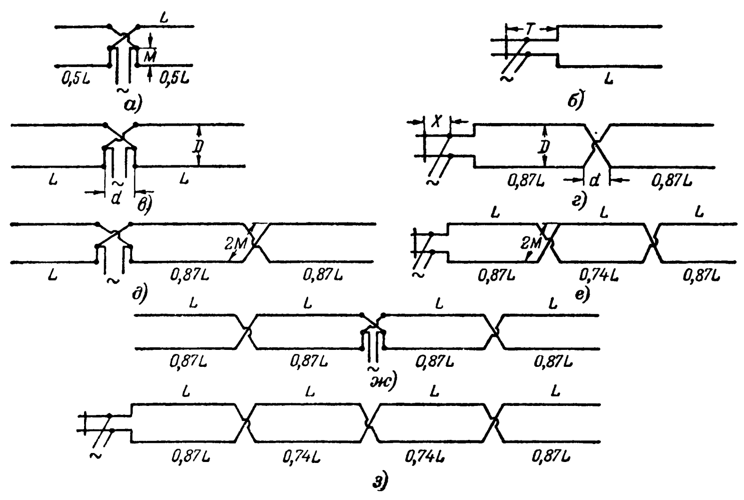
Из табл. 8 видно, что максимальный выигрыш достигается при расстоянии между вибраторами от 0,05 λ до 0,167 λ.

Таблица 8

Расстояния между вибраторами D/λ	Выигрыш, *дб*
0,05	4,1
0,125	4,3
0,167	4,0
0,25	3,8
0,333	3,1
0,5	2,2
0,625	1,7
1,125	3,0

Для осуществления противофазного питания расположенных друг за другом вибраторов нужно, чтобы длина проводов, соединяющих их с противоположными точками фидера, была одинакова. Благодаря малым расстояниям между вибраторами фазирующие шлейфы могут быть заменены перекрещивающимися проводами, что упрощает конструкцию системы по сравнению с синфазными антеннами.

На фиг. 103 приведены основные типы противофазных антенн. В левом столбце изображены антенны, питающиеся



Фиг. 103. Противофазные антенны, питающиеся в центре и с конца. *а* и *б* — односекционные антенны; *в* и *г* — двухсекционные антенны; *д* и *е* — трехсекционные антенны; *ж* и *з* — четырехсекционные антенны.

в центре, а в правом — питающиеся с конца. Последние требуют более тщательной настройки.

Размеры излучателей не критичны. Неточность в установлении их длины может быть скомпенсирована изменением длины соединительных проводов. Единственный размер, который должен быть строго выдержан, — это общая

длина проводов секции (излучателя и соединительного провода от одного вибратора до другого). Она должна быть резонансной, т. е. содержать целое число полуволн.

Вследствие сильной связи, существующей между близко расположенными вибраторами, изменяется их резонансная длина. Теоретически учесть это изменение весьма трудно и приходится в основном руководствоваться опытными данными, производя окончательную регулировку с помощью согласующего трансформатора.

Наиболее простыми системами являются односекционные антенны (фиг. 103,*а* и *б*), представляющие собой по сути дела расширенный на конце фидер. Питание их производится с конца через согласующий трансформатор или в центре. Такие антенны имеют максимум излучения под низкими углами к горизонту и слабую направленность в горизонтальной плоскости. Для сужения характеристики излучения в горизонтальной плоскости противофазные антенны часто выполняют в виде системы синфазных вибраторов. На фиг. 103,*в* и *г* изображены антенны, в которых каждый из противофазных излучателей состоит из двух синфазных вибраторов, а на фиг. 103,*д*, *е* и *ж*, *з* показаны трехэлементные и четырехэлементные антенны. Характеристики направленности этих антенн в горизонтальной плоскости показаны там же.

Вследствие малой величины сопротивления излучения непосредственное соединение антенны с высокоомным фидером недопустимо. Поэтому обычно согласование осуществляется с помощью резонансного трансформатора. Только при числе секций свыше трех становится возможным осуществлять питание антенны несогласованным фидером.

В табл. 9 приведены углы раствора диаграммы направленности многоэлементных антенн в горизонтальной плоскости; величина их определяется двумя направлениями, по которым уменьшение излучения по сравнению с главным направлением составляет 3 *дб*. В последнем столбце табл. 9 приводятся выигрыши в горизонтальной плоскости противофазных антенн, которые приблизительно равны выигрышам синфазных антенн с рефлекторами.

Для того чтобы дать некоторые ориентировочные данные, которые могут оказать помощь при первоначальном конструировании таких антенн, в табл. 10 приведены параметры некоторых противофазных антенных систем, работающих в различных диапазонах. Здесь L — длина излучателя; $2M$ — длина провода перекрестья; D — расстояние между

Число синфазных вибраторов в ряду	Ширина луча при ослаблении на 3 *дб*, град.	Выигрыш по сравнению с полуволновым диполем, *дб*	Выигрыш синфазной антенны с рефлектором или противофазной антенны, *дб*
1	43	0	4
2	30	1,8	5
3	17	3,5	6,5
4	12	4,5	7,5
5	9	5,3	8,3

вибраторами; *d* — расстояние между секциями; *T* — длина трансформатора; *X* — приблизительное расстояние точки присоединения питающего фидера от закорачивающей перемычки трансформатора.

Предполагается, что питающий фидер имеет волновое сопротивление 600 *ом*.

Значения *X* почти точны для двухсекционной антенны; для односекционной антенны они несколько преуменьшены, а для трехсекционной и четырехсекционной антенн несколько преувеличены.

Полуволновый трансформатор применяется только с односекционной антенной, питающейся в центре.

В зависимости от расположения секции длина излучателей оказывается различной и получается умножением *L* на 0,50, на 0,74 или на 0,87.

Диапазон 28 *мггц* разделен на две части. Те или иные из указанных размеров предпочтительно использовать в зависимости от того, в какой половине диапазона чаще работает радиостанция. Однако с меньшей эффективностью антенна сможет работать и во второй половине диапазона.

Цифры, приведенные в табл. 10, можно использовать и при построении антенн других диапазонов, уменьшая или увеличивая их в соответствующее число раз.

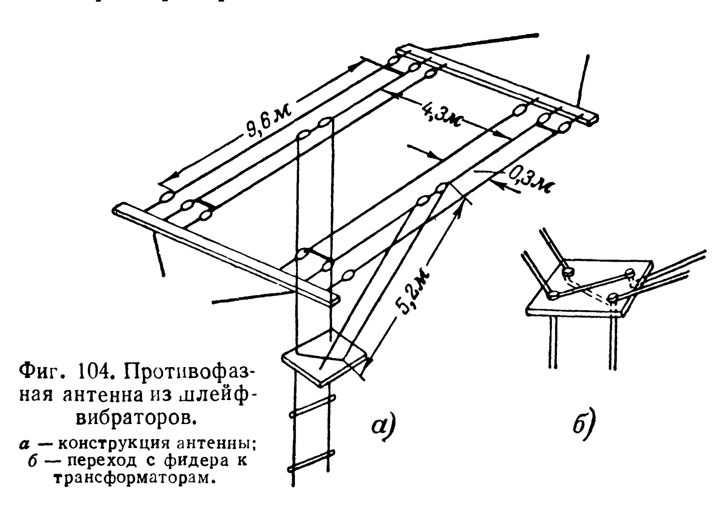
Таблица 10

Диапазон *f*, *мггц*	*L*, *м*	*D*, *м*	*M*, *м*	*d*, *м*	*T* (0,25 λ), *м*	*T* (0,5 λ), *м*	*X*, *м*
7,0—7,2	18,30	5,28	2,70	1,22	7,94	18,6	1,22
14,0—14,4	9,15	2,64	1,35	0,61	3,96	9,46	0,61
28,0—29,0	4,58	1 32	0,68	0 46	2,13	4,58	0,31
29,0—30,0	4,42	1,26	0,60	0,46	2,13	4,58	0,31

Противофазная антенна из шлейф-вибраторов. Основной недостаток противофазных антенн — низкое значение сопро-

тивления излучения и связанные с этим трудности в питании и настройке могут быть устранены применением в качестве излучателей шлейф-вибраторов.

На фиг. 104 приведена конструкция односекционной противофазной системы, состоящей из двух шлейф-вибраторов с центральным питанием. Размеры, указанные на фиг. 104, выбраны для работы в диапазоне 14 *мггц* и на высших гармониках. Расстояние между вибраторами устанавливается равным 0,2 λ. При этом входное сопротивление каждого шлейф-вибратора составляет 300 *ом*. Питание от общего



Фиг. 104. Противофазная антенна из шлейф-вибраторов.

а — конструкция антенны; *б* — переход с фидера к трансформаторам.

фидера с волновым сопротивлением 600 *ом* подводится к вибраторам в противофазе через четвертьволновый согласующий трансформатор, увеличивающий входное сопротивление антенны в 4 раза. Волновое сопротивление трансформатора равно 564 *ом*.

Если расстояние между вибраторами уменьшить до 0,15 λ, то сопротивление излучения каждого элемента уменьшится до 15 *ом*. Трехэлементный шлейф-вибратор будет иметь сопротивление излучения $R_\Sigma = 180$ *ом*.

Такая антенна, излучая под низкими углами, не критична в настройке. Токи и напряжения в ней невелики, поэтому к качеству изоляции не предъявляются столь жесткие требования, как в обычных противофазных системах.

Антенна с одним пассивным элементом. Применение пассивных вибраторов удобно тем, что дает возможность сильно упростить систему питания.

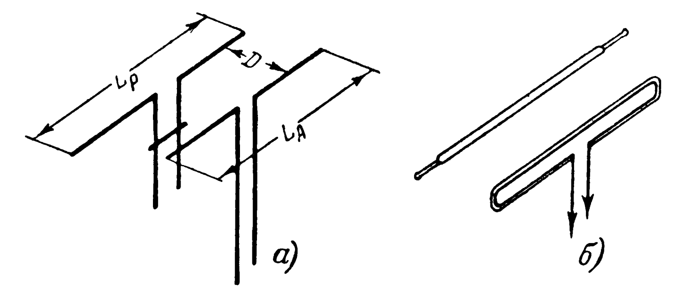
С двумя одинаковыми вибраторами (фиг. 105), расположенными на расстоянии четверти волны друг от друга, удается получить выигрыш по главному направлению в 4 *дб* и ослабление излучения назад по отношению к излучению в главном направлении на 5 *дб*.

Длину активного и пассивного вибраторов следует подбирать с учетом изменения резонансной длины вибраторов вследствие их взаимодействия. С достаточной для практических целей точностью размеры антенны можно рассчитать, пользуясь следующими формулами:

$$L_A = \frac{143,4}{f}, \quad L_p = \frac{146,6}{f} \quad \text{и} \quad D = \frac{75}{f},$$

где L_A, L_p и D — размеры, *м*;

f — частота, *мггц*.



Фиг. 105. Антенны с пассивными рефлекторами.

а — рефлектор настраивается с помощью шлейфа; *б* — рефлектор настраивается изменением его длины.

В зависимости от расстояния до пассивного вибратора и от его настройки он может играть роль как рефлектора, так и директора.

Диаграммы направленности и зависимость сопротивления излучения от расстояний между вибраторами при различной настройке пассивного вибратора были приведены на фиг. 56. Рассмотрение фиг. 56 приводит к выводу, что с помощью настроенного рефлектора невозможно получить оптимальный вид характеристики излучения системы.

Легко видеть, что для каждого положения пассивного вибратора имеется свой наивыгоднейший угол сдвига фаз (расстройка, определяемая длиной вибратора или шлейфа), при котором достигается максимальный выигрыш в прямом и ослабление излучения в обратном направлениях. Так, для выполнения функции директора лучшим является расстояние $D = 0,1\,\lambda$. При укорочении директора по сравнению

с резонансной длиной его входное сопротивление будет носить емкостный характер и ток будет опережать по фазе наведенное напряжение ($\theta < 0$). Регулируя величину расстройки (изменением длины вибратора), можно добиться выигрыша в 5 *дб* и ослабления излучения назад на 17 *дб*. Сопротивление излучения при этом будет еще довольно велико ($R_\Sigma = 30 \div 40$ *ом*).

Из рассмотрения фиг. 56 видно, что при $\theta > 0$ сочетание хорошего выигрыша по главному направлению с большим ослаблением обратного излучения и относительно небольшим уменьшением сопротивления излучения достигается также и при расстоянии $D = 0{,}15\ \lambda$. Если в этом случае пассивный вибратор выполняет функции рефлектора, то для получения требуемого сдвига фаз между токами в обоих вибраторах следует несколько удлинить его по сравнению с резонансной длиной.

Применение рефлектора способствует увеличению дальности действия радиостанции не только за счет усиления излучения по главному направлению, но и благодаря увеличению излучения под низкими углами к горизонту.

Увеличить входное сопротивление антенны с пассивным рефлектором или директором можно, используя в качестве излучателя шлейф-вибратор (фиг. 105,*б*).

Настройка и регулировка антенны производятся по показаниям прибора, включенного в середине небольшого диполя, установленного на некотором расстоянии от антенны. Сначала помещают его впереди антенны, а затем на таком же расстоянии сзади. При этом замечают показания прибора и настраивают систему так, чтобы ослабление излучения назад было максимальным.

Для удобства настройки рефлектора целесообразно выполнять его в виде выдвигающихся концентрических трубок. Настройка системы производится в следующем порядке:

1. Длина обоих вибраторов устанавливается равной резонансной длине одиночного излучателя.

2. При слабой связи с передатчиком производят соединение антенны с питающим фидером, не обращая внимания на согласование.

3. Измеряют отношение излучения вперед и назад.

4. При настройке директора постепенно укорачивают, а при настройке рефлектора постепенно удлиняют пассивный вибратор (на 4—5 *см* каждый раз) до получения оптимального отношения излучения вперед и назад. При этом

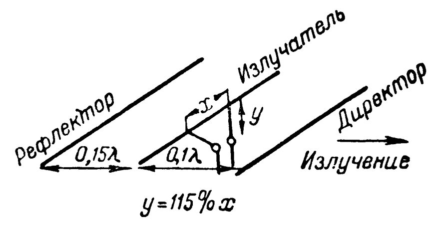
не следует обращать внимания на ослабление излучения, которое может произойти за счет ухудшения согласования.

5. Отрегулировав длину пассивного излучателя, больше его не трогают. Слегка изменяют в ту и другую сторону длину активного вибратора до получения максимальной силы поля. После этого вибратор больше не регулируют.

6. Производят согласование фидера с антенной.

В некоторых случаях после операции «5» можно повторить операцию «4», последовательно добиваясь более точной настройки.

Конструкция антенной системы должна быть максимально жесткой. Прогибание отдельных частей под действием силы тяжести, от ветра и по другим причинам может вызвать значительные расстройки во всей системе и изменить диаграмму направленности антенны. Одновременно будут нарушаться условия согласования с фидером.



Фиг. 106. Антенна с рефлектором и директором.

Чем меньше расстояние между вибраторами, тем труднее ее настраивать, поэтому для начинающих рекомендуется сначала освоить работу с антеннами, имеющими расстояние между активным и пассивным вибратором не меньше $0{,}2 \div 0{,}25\,\lambda$.

Антенна с двумя пассивными вибраторами. Поскольку использование одного рефлектора или директора не дает достаточно большого выигрыша по главному направлению, часто применяют многовибраторные антенны с одним пассивным рефлектором и одним или несколькими пассивными директорами.

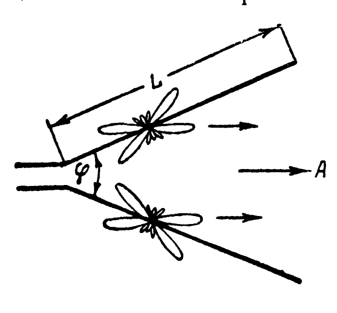
Простейшей из таких антенн является трехэлементная антенная система, у которой расстояние от излучателя до директора равно $0{,}1\,\lambda$, а до рефлектора — $0{,}15\,\lambda$ (фиг. 106). При правильной настройке она дает ослабление излучения назад на 30 *дб* при выигрыше в 10 *дб*.

Для настройки системы в середине пассивных вибраторов устанавливаются временные перемычки. Замыкая одну из них и размыкая другую, регулируют по очереди рефлектор и директор до получения максимального отношения

интенсивностей излучения вперед и назад. После этого замыкают обе перемычки и производят небольшую окончательную коррекцию всей системы.

Сопротивление излучения у данной антенны очень мало, поэтому необходимо применять согласующие трансформаторы или использовать шлейф-вибраторы. Наиболее просто согласование осуществляется с помощью расширяющейся линии. Ориентировочно длина расширяющейся части y должна быть на 15% длиннее расстояния между вводами x.

Направленные антенны из длинных проводов. Уголковая антенна ведет себя как ненаправленный излучатель, если длина сторон ее меньше длины волны. Если же в них укладывается некоторое количество полуволн, то каждый из излучателей превращается в гармониковую антенну, характеристика излучения которой имеет направленный лепестковый характер. Чем больше число полуволн укладывается в проводе, тем более ярко выражены направленные свойства сторон (фиг 107).



Фиг. 107. Уголковая гармониковая антенна.

Если желательно получить максимум излучения в направлении A, то нужно направить излучатели антенны так, чтобы главные максимумы их диаграмм оказались ориентированы в выбранном направлении. Тогда поля, создаваемые обоими проводами в этом направлении, будут складываться, и антенна будет обладать заметными направленными свойствами.

Вследствие симметричного расположения лепестков относительно проводов усиление излучения произойдет и в противоположном направлении. Чтобы устранить его, необходимо сзади основной антенны установить такую же антенну, которая будет выполнять роль рефлектора. Расстояние до рефлектора и фаза тока в нем должны определяться по правилам, общим для всех рефлекторов.

Чем больше длина проводов, тем меньше угол между проводами антенны и больше выигрыш по главному направлению.

В табл. 11 приведены данные направленных уголковых антенн различной длины и углы возвышения главного лепестка над горизонтом при высоте подвеса антенны над землей $h=\lambda$.

Антенны из длинных проводов, как правило, никогда не бывают критичны в настройке и с успехом могут применяться в 2—3-кратных диапазонах. Естественно, что наибольшей эффективностью антенна будет обладать на наиболее коротковолновом диапазоне. На других диапазонах луч будет расширяться и угол возвышения над горизонтом возрастать.

Таблица 11

L/λ	φ, град.	Угол возвышения главного максимума, град.
1	110	31
2	70	27
3	60	23
4	57	20
8	35	14

Необходимо заметить, что максимальное усиление имеет место в плоскости, проходящей через излучатели. По другим направлениям усиление будет меньше. Общая картина поля имеет сложный многолепестковый характер. Действие рефлектора также в полной мере проявляется только в плоскости антенна — рефлектор.

Питание уголковой антенны обычно осуществляется с помощью двухпроводного высокоомного фидера. Для согласования может быть применен один из трансформаторов, описанных в гл. 1.

29. Антенны бегущей волны

Горизонтальный провод с бегущей волной. Длинный провод, в котором устанавливается бегущая волна, интенсивно излучает электромагнитную энергию.

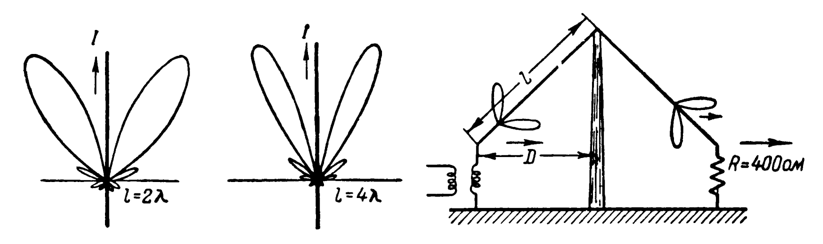
У гармониковых антенн в результате отражения энергии от разомкнутого конца вдоль провода непрерывно бегут в противоположных направлениях падающие и отраженные волны. Поэтому гармониковые антенны всегда имеют противоположные главные направления излучения. В антеннах бегущей волны энергия движется только в одном направлении, поэтому они лишены обратного излучения и не нуждаются в рефлекторах.

На фиг. 108 приведены характеристики излучения провода с бегущей волной тока длиной в 2λ и 4λ. Рассмотрение их показывает, что в свободном пространстве провод имеет диаграмму излучения в виде воронки, образованной вращением лепестка около него. Острота диаграммы и приближение лепестков к проводу возрастают с увеличением его длины. Благодаря почти полному отсутствию боковых

лепестков энергия концентрируется по главному направлению лучше, чем у гармониковых антенн.

В присутствии земли диаграмма направленности изменяется по правилам, общим для всех горизонтальных антенн.

Отметим очень важную общую особенность антенн с бегущей волной. Вследствие того, что волновое сопротивление линии не зависит от частоты, режим бегущей волны будет сохраняться на любой рабочей волне. Изменяться будет только вид диаграммы направленности: на более коротких волнах антенна будет более направленной, чем на более



Фиг. 108. Диаграммы направленности антенн бегущей волны.

Фиг. 109. Полуромбическая антенна.

длинных. Поэтому антенны бегущей волны могут работать в широком диапазоне частот, — это их основное достоинство.

Недостатками всех антенн бегущей волны являются потери значительной доли энергии в нагрузочном сопротивлении и большие размеры излучателя.

Полуромбическая антенна. Простейшей антенной бегущей волны является полуромбическая антенна, изображенная на фиг. 109. Достоинство антенны состоит в том, что для установки ее достаточно всего лишь одной мачты. Вторым проводом линии служит земля. На конце антенна замыкается на землю через активное сопротивление порядка 400 *ом*, равное волновому сопротивлению линии. При правильно подобранном угле наклона проводов максимумы их диаграмм направленности будут ориентированы в горизонтальном направлении.

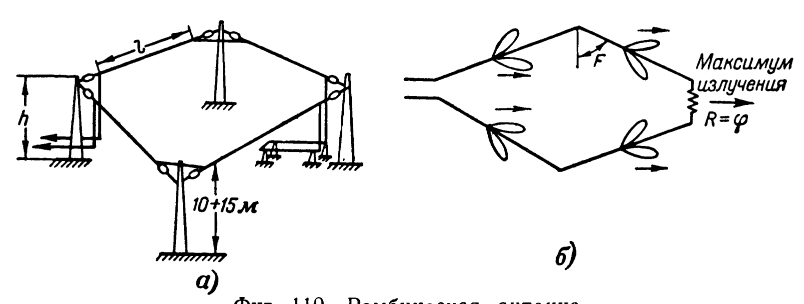
При ориентировочном выборе данных антенны рекомендуется выдерживать следующее соотношение между ее размерами:

$$l = D + 0{,}5\lambda.$$

Наивыгоднейший угол наклона может быть легко найден экспериментально при монтаже системы.

Нагрузочное сопротивление должно быть рассчитано на мощность рассеивания до 50% от мощности передатчика и быть безиндукционным. Его обычно выполняют из провода с высоким удельным сопротивлением и с минимальным числом изгибов большого радиуса.

Ромбическая антенна. Ромбическая антенна образуется четырьмя длинными проводами, подвешенными на четырех мачтах (фиг. 110,*а*). На конце провода замкнуты на активное сопротивление, равное волновому сопротивлению антенны. Тупой угол ромба выбирается так, чтобы направления



Фиг. 110. Ромбическая антенна.

а — конструкция антенны; *б* — ориентировка диаграмм направленности проводов

главных максимумов излучения всех четырех излучателей совпадали. Тогда антенна обладает в плоскости своего полотна островыраженной направленностью. Направленность ромбической антенны значительно выше, чем у полуромбической. Характеристика направленности ромбической антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях приведена на фиг. 111.

Угол возвышения главного лепестка зависит от высоты подвеса антенны. Для получения благоприятных для дальней связи углов возвышения нужно, чтобы высота подвеса была не меньше 0,7 λ применяемого диапазона.

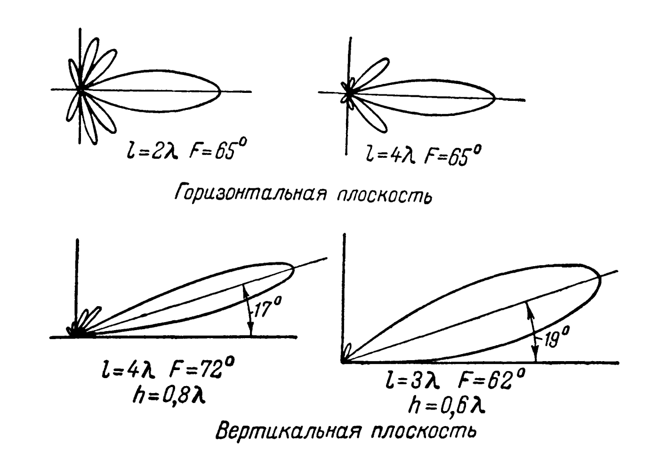
Волновое сопротивление ромбической антенны обычно равно 600—800 *ом*, что очень удобно для непосредственного согласования ее с двухпроводной воздушной линией. Нагрузочное сопротивление часто выполняется в виде замкнутой стальной линии с волновым сопротивлением 600—800 *ом*.

При настройке ромбической антенны в первую очередь нужно добиться согласования антенны с нагрузочным со-

противлением и получить в ее проводах бегущую волну. Для этого обычно приходится слегка изменять расстояние между проводами поглотительной линии.

При достижении согласования в питающем фидере установится либо бегущая волна, либо на его конце будет находиться узел или пучность напряжения. Правильность согласования антенны с фидером проверяется с помощью индикаторов бегущей волны.

Если согласовать питающий фидер с антенной не удается, то это говорит о том, что величина нагрузочного сопро-



Фиг. 111. Диаграммы направленности ромбической антенны.

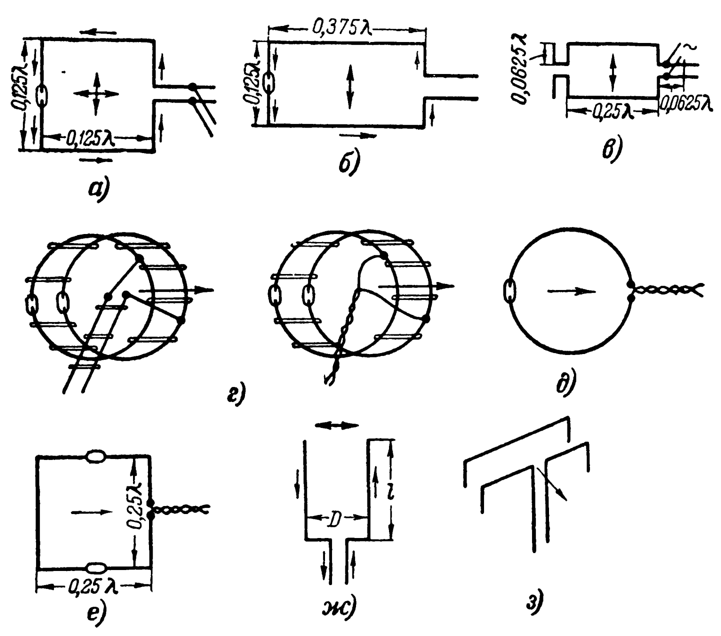
тивления недостаточна и следует увеличить длину поглотительной линии.

Преимуществами ромбических антенн являются простота устройства и питания, широкий диапазон рабочих частот, сравнительно низкое расположение над землей и однонаправленное излучение. К недостаткам таких антенн следует отнести большие размеры, рассеяние энергии в боковых лепестках и бесполезное поглощение энергии в оконечном сопротивлении.

Существует довольно много различных типов ромбических антенн. Советскими инженерами разработаны конструкции более сложных и совершенных ромбических антенн, чем те, которые были описаны выше. Необходимые сведения о них читатель найдет в книге А. А. Пистолькорса «Антенны».

30. Компактные направленные антенны

Из рассмотренных выше примеров следует, что направленные антенные системы обладают сравнительно большими размерами, что затрудняет их конструктивное выполнение и не позволяет делать их вращающимися. Несколько изменив конструкцию антенны, можно за счет некоторого ухуд-



Фиг. 112. Компактные направленные антенны.

а, *б* и *в* — согнутые полуволновые вибраторы; *г* — двойной кольцевой вибратор; *д* — кольцевой диполь; *е* и *з* — согнутые диполи с пассивными рефлекторами; *ж* — простейшая противофазная антенна.

шения излучающих и направленных свойств сделать ее компактной, вращающейся.

На фиг. 112 приведены некоторые типы направленных антенн, имеющих сравнительно небольшие размеры.

Антенна, изображенная на фиг. 112,*а*, представляет собой полуволновый вибратор, каждая половина которого согнута в виде буквы П. Концы скрепляются изоляторами. Рассмотрение направления токов в отдельных частях такой антенны показывает, что в результате изгиба образовались две пары противофазных излучателей, расположенных на

расстоянии 0,125 λ друг от друга. Если эту антенну расположить в горизонтальной плоскости, то она будет создавать излучение под низкими углами к горизонту.

Входное сопротивление антенны, изображенной на фиг. 112,*а*, очень невелико. Поэтому ее следует питать через согласующий трансформатор. Делать антенну вращающейся нет необходимости, так как она излучает более или менее равномерно по всем направлениям в горизонтальной плоскости. Два других варианта подобных антенн приведены на фиг. 112,*б* и *в*.

Часто встречаются диполи, каждая из половин которых сгибается в кольцо (фиг. 112,*г*), так что расстояние между концами диполя составляет около 0,5 *см* на 1 *м* длины волны. Оба кольца выполняются из тонких трубок, помещаются друг от друга на расстоянии примерно 2,5 *см* на 1 *м* длины волны и укрепляются на легкой деревянной раме. Такая антенна имеет максимум излучения в направлении, указанном стрелкой. Выигрыш по главному направлению невелик: напряженность поля приблизительно на 20% больше напряженности поля полуволнового диполя. Зато отношение интенсивностей излучения вперед и назад равно $5 \div 7$ *дб*.

Питание антенны весьма затруднено вследствие малой величины сопротивления излучения. Для согласования с высокоомным фидером его провода присоединяют к различным кольцам, выдерживая между точками присоединения расстояние в 10 *см* на 1 *м* длины волны. При питании антенны 70-омным фидером расстояние между вводами должно устанавливаться в 2,5 *см* на 1 *м* длины волны. Правильное положение вводов находится по режиму в фидере или по максимальной нагрузке генератора.

Размеры антенны не критичны.

На фиг. 112,*д* приведен третий вид согнутого диполя. Максимум диаграммы излучения направлен в сторону стрелки — от разомкнутого конца к максимуму тока в вибраторе.

Антенна, изображенная на фиг. 112,*е*, представляет собой согнутый диполь с пассивным рефлектором. Изгиб и скрепление концов изоляторами придают всей системе жесткость и компактность. Такую систему легко сделать вращающейся. Питание ее осуществляется, как в обычной системе диполь—рефлектор. Выигрыш вперед равен 4 *дб*.

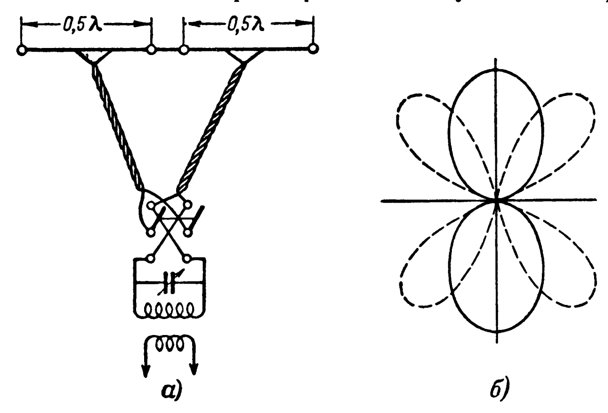
На фиг. 112,*ж* изображена простейшая противофазная антенна. Расстояние между излучателями $D = 0,5\,\lambda$. Длина излучателей l может лежать в пределах от 0,25 λ до 0,5 λ.

При вертикальной поляризации антенну легко сделать вращающейся. На фиг. 112,з изображена согнутая антенна с согнутым рефлектором.

Легко убедиться, что большинство этих антенн может работать в двух любительских диапазонах.

31. Антенны с изменяемыми диаграммами направленности

Решение задачи о работе с направленными антеннами по различным направлениям может быть получено не только путем создания вращающихся антенн, но и методом электрического изменения характеристики излучения. Второй метод часто не позволяет сохранять по всем желаемым направлениям оптимальный вид диаграммы направленности. Изменение характеристики направленности не всегда получается полным, но зато при этом не требуется устройства поворотных механизмов и могут быть использованы такие системы антенн, вращение которых невозможно.



Фиг. 113. Горизонтальная антенна с изменяемой диаграммой направленности.
а — схема питания; *б* — диаграмма направленности.

Одна из простейших антенн такого рода изображена на фиг. 113,*а*. Точное согласование достигается подбором положения точек присоединения фидера к вибраторам. Длины обоих фидеров должны быть одинаковы или отличаться друг от друга на целое число полуволн. Один из фидеров присоединяется к контуру через обычный перекидной переключатель. В зависимости от положения переключателя вибраторы будут питаться в фазе или в противофазе. В пер-

вом случае образуется синфазная система, максимум характеристики которой направлен перпендикулярно к оси антенны (сплошная линия на фиг. 213,*б*), а во втором — противофазная. Характеристика излучения ее примет вид, изображенный пунктиром на фиг. 213,*б*.

Изменением длины одного из питающих фидеров можно в той или иной степени влиять на фазу тока в одном из вибраторов. Это позволяет в широких пределах изменять вид характеристики излучения системы.

Фиг. 114. Вертикальная антенна с изменяемой диаграммой направленности.

а — схема питания; *б* — диаграмма направленности.

На таком же принципе основана работа пары вертикальных вибраторов (фиг. 114,*а*). При переходе от синфазного питания к противофазному максимум характеристики излучения поворачивается на 90° (фиг. 114,*б*).

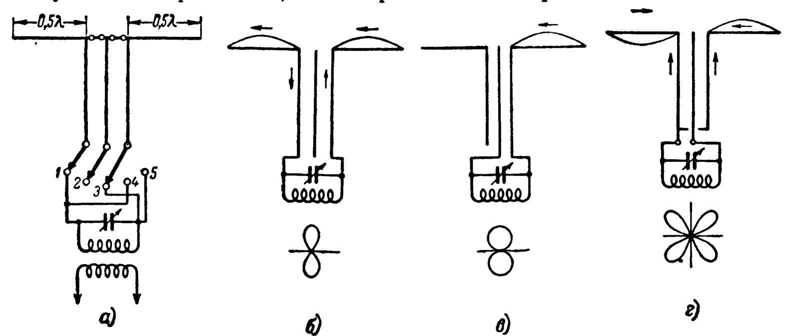
Интересные возможности изменения диаграмм направленности дает применение трехпроводного фидера. Третий провод в верхней части укрепляется на изоляторе, а нижним концом соединяется с переключателем (фиг. 115,*а*).

Если система состоит из двух полуволновых вибраторов, то в первом положении тройного переключателя (фиг. 115,*б*) средний провод остается отключенным и антенна представляет собой систему двух синфазных вибраторов. Во втором положении переключателя (фиг. 115,*в*) одна из половин антенны используется как полуволновый вибратор, питающийся с конца. В третьем положении переключателя два крайних фидера соединяются параллельно и оба излучателя используются в качестве волновой гармониковой антенны (фиг. 115,*г*).

Питание осуществляется в центре, где находится узел тока.

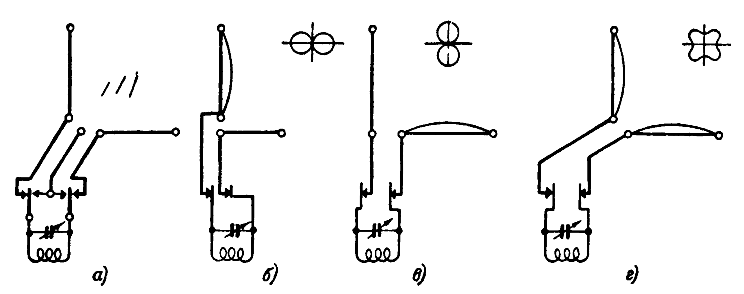
В данной системе фидер работает в режиме стоячих волн, поэтому он должен быть выполнен в виде открытой воздушной линии.

Подобная система может работать в трех и более любительских диапазонах. В самом длинноволновом диапазоне можно использовать первое соединение, если общая длина излучателей равна 0,5 λ. Переход с синфазной антенны на



Фиг. 115. Изменение диаграммы направленности при питании антенны трехпроводным фидером.

а — схема устройства; *б* — синфазное питание; *в* — работа одной половиной; *г* — использование в качестве гармониковой антенны.



Фиг. 116. Уголковая антенна, питающаяся трехпроводным фидером.

а — схема питания; *б* и *в* — работа одной половиной; *г* — работа двумя половинами

гармониковую изменяет направление максимумов диаграммы.

На фиг. 116 изображена уголковая антенна с трехпроводным фидером. В первом и втором положении переключателя используются по очереди каждый из вибраторов антенны, а в третьем одновременно оба.

Такая система позволяет направлять максимум излучения в сторону корреспондента и уничтожает провалы в диаграмме направленности.

ГЛАВА ПЯТАЯ

АНТЕННЫ УЛЬТРАКОРОТКИХ ВОЛН

32. Особенности распространения ультракоротких волн

Диапазон ультракоротких радиоволн включает в себя все волны короче 10 *м*. Основная характерная особенность этого диапазона — отсутствие отраженного пространственного луча. Для ультракоротких радиоволн критический угол становится равным нулю, т. е. в обычных условиях электромагнитные волны, падающие на ионосферные слои, почти не преломляясь, уходят в мировое пространство и на землю не возвращаются. Вследствие этого связь на ультракоротких волнах может осуществляться только за счет земного луча.

Явление огибания земной поверхности на ультракоротких волнах, как правило, проявляется в очень слабой степени. Поэтому практически связь может осуществляться только в пределах прямой видимости, т. е. на таком расстоянии, когда кривизна земной поверхности не заслоняет передающую антенну от приемной.

Отсюда практический вывод: для осуществления связи на большие расстояния нужно поднимать приемную и передающую антенны на возможно бóльшую высоту. Излучение антенны должно происходить под минимальными углами к горизонту.

Диапазон ультракоротких волн обычно разбивают на три поддиапазона: метровых, дециметровых и сантиметровых волн. Такое деление целесообразно потому, что аппаратура, применяемая на каждом из этих поддиапазонов, имеет определенные особенности.

Метровые волны (от 10 до 1 *м*) используются главным образом для телевидения, радионавигации, телеуправления. Часть этого поддиапазона отведена для работы любителей.

Дециметровые волны (от 1 до 0,1 *м*) применяются в радиолокации, телеуправлении и для релейных ретрансляционных линий.

Сантиметровые волны (от 10 до 1 *см*) используются в основном в радиолокации.

При работе земным лучóм в зоне прямой видимости в месте приема поляризация электромагнитных волн будет такой же, как и у передающей антенны. Следовательно, чтобы прием на ультракоротких волнах был наиболее эффективен,

необходимо, чтобы поляризация приемной и передающей антенн была одинакова. В городах иногда наблюдается изменение плоскости поляризации, происходящее за счет многократных отражений от высоких зданий.

В связи с этим встает вопрос о преимуществах того или иного вида поляризации. До сих пор единого установившегося мнения по этому вопросу еще не выработано, но согласно последним опытным данным предпочтение нужно отдать горизонтальной поляризации. При ней в приемной антенне наводится мощность помех, примерно вдвое меньшая, чем при вертикальной поляризации, и искажения поля вследствие отражений получаются меньше. Однако в ряде случаев соображения конструктивного характера заставляют использовать вертикально поляризованные волны.

На волнах дециметрового и сантиметрового диапазонов, где, как правило, используются остронаправленные антенны, вопрос о выборе поляризации менее существенен.

При некоторых состояниях земной атмосферы оказывается возможным устанавливать на ультракоротких волнах связь на несколько тысяч километров. Это явление было подробно исследовано проф. П. Е. Краснушкиным.

33. Особенности антенн метровых волн

Малая длина волн этого диапазона открывает широкие возможности для применения направленных антенных систем. Их легко можно сделать вращающимися, что позволяет полностью использовать все преимущества направленных излучателей. Как и на коротких волнах, помимо выигрыша по главному направлению, такие антенны создают излучение под низкими углами к горизонту, что очень важно для получения максимальной дальности связи.

Одной из существенных проблем антенной техники в области ультракоротких радиоволн является расширение полосы пропускания антенн. Оно оказывается необходимым, например, для телевизионной передачи, для передач, в которых используются специальные виды модуляции, и т. п.

Решается эта задача использованием шлейф-вибраторов, обладающих большим сопротивлением излучения, и применением излучателей с большими поперечными размерами.

При конструировании ультракоротковолновых антенн нужно стремиться, чтобы число крепящих деталей, в том числе и изоляторов, было минимальным. Это важно не только с точки зрения уменьшения диэлектрических потерь, но

и потому, что крепящие приспособления вносят дополнительную расстройку в вибратор, изменяя его резонансную длину. На ультракоротких волнах эта расстройка может быть существенной.

Желательно применять изоляторы исключительно из радиофарфора или высокочастотной керамики. Провода, крепящие антенну или мачту, должны быть разделены изоляторами на участки длиной не более 0,375 λ, чтобы избежать потерь на отсос энергии и нежелательные отражения.

Питание антенн желательно осуществлять согласованным фидером. В диапазоне ультракоротких волн целесообразно использовать двухпроводный фидер с волновым сопротивлением порядка 400 *ом*. Если выполнить его из провода диаметром 1,6—1,2 *мм*, то потери на излучение будут невелики. Максимальным допустимым расстоянием между проводами фидера в диапазоне метровых волн следует считать 10 *см*.

Особое значение на ультракоротких волнах приобретает применение коаксиальных кабелей, лишенных потерь на излучение. Свитый низкоомный фидер очень удобен в монтаже и для согласования, но при длине больше 3 λ — 4 λ диэлектрические потери в нем настолько возрастают, что применение его становится нецелесообразным. Для бо́льших расстояний следует использовать воздушную линию.

34. Слабонаправленные ультракоротковолновые антенны

Полуволновый вибратор. Основным типом излучателя на ультракоротких волнах является полуволновый вибратор. Питание его может осуществляться как в центре, так и с конца. Согласование с вибратором лучше всего производить отрезком расходящейся линии.

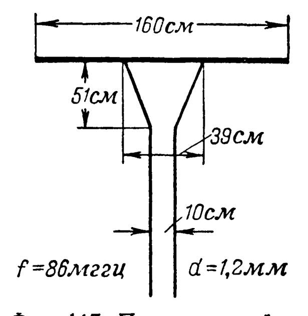
На фиг. 117 приведены данные такой антенны, выбранные для работы в диапазоне 86 *мггц*. При длине вибратора $l = 1{,}60$ *м* и выполнении его из провода диаметром $d = 2{,}6$—1,6 *мм* антенна будет хорошо работать в полосе частот около 2 *мггц*.

Для переносных радиостанций очень удобна антенна, сделанная из двух стальных рулеток (фиг. 118).

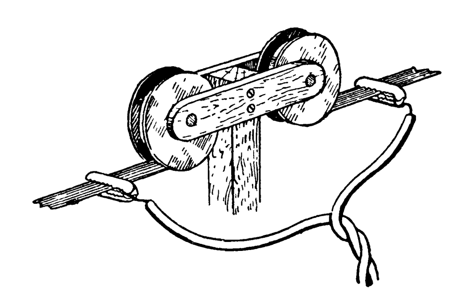
Рулетки помещаются в эбонитовом или деревянном держателе, укрепленном на мачте. По мере надобности стальные линейки вытягиваются и играют роль половин диполя. Большая ширина полотна рулетки обеспечивает достаточно широкую полосу пропускания антенны. Питание такой ан-

тенны осуществляется с помощью низкоомного фидера. Концы фидера присоединяются к рулетке с помощью пружинных зажимов.

На ультравысоких частотах относительный диаметр излучателей (d/λ) сильно возрастает, поэтому увеличивается и величина укорочения, необходимого для настройки вибратора в резонанс (см. § 12). Расчет резонансной длины вибраторов следует производить по формуле



Фиг. 117. Полуволновый вибратор для диапазона 85 ÷ 87 *мггц*.


Фиг. 118. Переносная антенна из двух стальных рулеток.

$$l_A = \frac{141}{f},$$

а длину полуволнового участка воздушной линии — по формуле

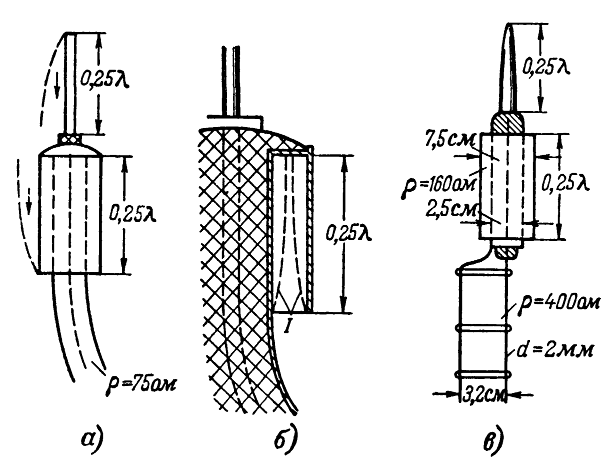
$$l_ф = \frac{146}{f},$$

где l_A и $l_ф$ — длины, *м*;
f — частота, *мггц*.

На фиг. 119 показан способ центрального питания полуволнового вибратора с помощью коаксиального кабеля. Излучающие части вибратора выполняют обычно из медных или алюминиевых трубок. Трубка, надеваемая на кабель, большей частью берется толще, чем та, которая присоединяется к средней жиле кабеля.

Половина диполя, надетая на кабель, вместе с оказавшейся внутри нее частью наружной поверхности кабеля образует четвертьволновую концентрическую линию. Она играет роль «металлического изолятора». Образующаяся внутри нее стоячая волна тока имеет узел у конца вибра-

тора (фиг. 119,*б*), поэтому он оказывается изолированным по высокой частоте от внешней оплетки кабеля. Такой метод питания, помимо конструктивной простоты и удобства, полностью исключает потери в фидере на излучение и позволяет осуществлять непосредственное согласование его с излучателем. Использовав кабель с волновым сопротивлением 70—80 *ом*, можно получить практически полное согласование его с антенной без применения трансформаторов.



Фиг. 119. Питание полуволнового вибратора коаксиальным кабелем и двухпроводным фидером.

а — конструкция антенны; *б* — стоячая волна тока между вибратором и кабелем; *в* — питание антенны двухпроводным фидером.

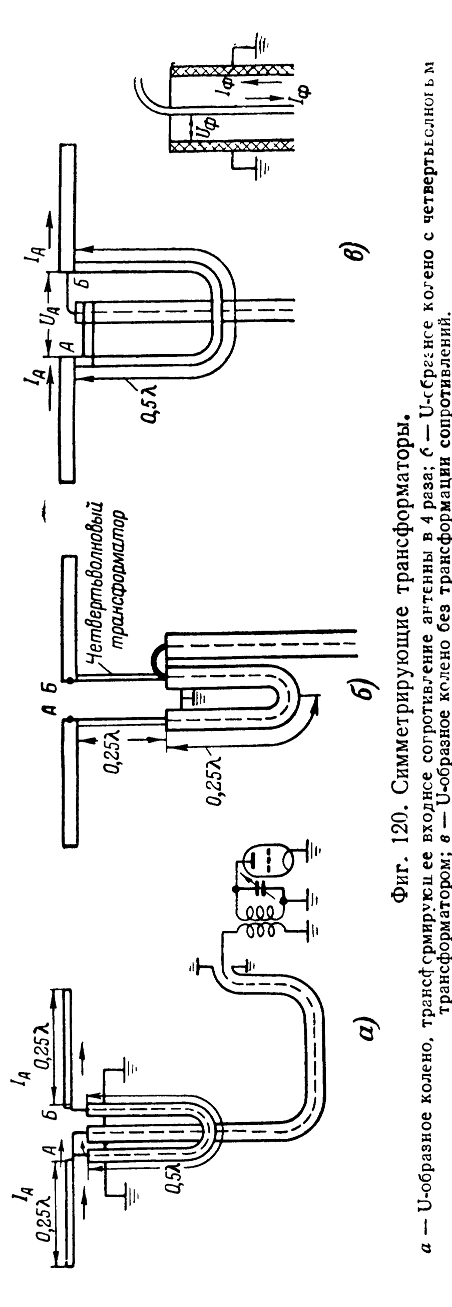
Основным недостатком данной системы являются большие потери в диэлектрике фидера. При длине фидера более 10 *м* они настолько возрастают, что становится более целесообразным осуществлять питание антенны с помощью двухпроводной 400-омной линии, состоящей из проводов диаметром 2 *мм*, расположенных на расстоянии 3,2 *см*. В этом случае внутренняя четвертьволновая коаксиальная линия используется как согласующий трансформатор (фиг. 119,*в*). Нижняя половина вибратора делается из трубок диаметром 7,5 *см* и длиной 60 *см*. Коаксиальный трансформатор выполняется из тонкостенной трубки диаметром 2,5 *см* (наружная жила) и внутреннего провода диаметром 2 *мм*. Волновое сопротивление такого коаксиального трансформатора равно 160 *ом*.

Все приведенные выше размеры рассчитаны для работы в диапазоне 86 *мггц*. Для других диапазонов они должны быть пропорционально изменены.

Симметрирующие трансформаторы. В диапазоне ультракоротких волн для питания антенн широко используется коаксиальный кабель, совершенно лишенный потерь на излучение. Однако в ряде случаев применение его сопряжено с некоторыми неудобствами. В § 26 было сказано о недостатках непосредственного соединения симметричных антенн с несимметричным кабелем. Для их устранения применяются так называемые симметрирующие трансформаторы.

В описанной выше антенной системе наружная поверхность внешней оплетки коаксиального кабеля и внутренняя поверхность нижней половины диполя образовывали такой симметрирующий трансформатор.

Второй тип симметрирующего трансформатора приведен на фиг. 120,*а*. Диполь будет симметричен только



Фиг. 120. Симметрирующие трансформаторы.

а — U-образное колено, трансформирующее входное сопротивление антенны в 4 раза; *б* — U-образное колено с четвертьволновым трансформатором; *в* — U-образное колено без трансформации сопротивлений.

в том случае, когда точки *А* и *Б*, к которым подводится питание, будут находиться под одинаковым по величине и противоположным по знаку потенциалом относительно земли. Поэтому нельзя непосредственно соединять одну половину диполя со средней жилой, а вторую — с внешней заземленной оплеткой кабеля. Для выполнения вышеупомянутого условия соединяют обе половины диполя со средней жилой; одну — непосредственно, а другую через отрезок коаксиального кабеля длиной в полволны, согнутого в виде буквы U, благодаря чему такой трансформатор часто называют просто U-коленом. Волна напряжения, пройдя по нему от точки *А* до точки *Б*, приобретет по отношению к земле противоположную фазу.

Необходимо иметь в виду, что данное симметрирующее устройство является также и трансформатором сопротивления. Действительно, ток в средней жиле кабеля (а следовательно, и равный ему ток на внутренней поверхности наружной оплетки) представляет собой сумму токов, текущих на входе обеих половин диполя:

$$I_{ф} = 2I_{A\,вх}.$$

Напряжение же в точках питания антенны *А* и *Б* вдвое больше напряжения в фидере, поскольку внешняя оплетка кабеля заземлена:

$$U_{ф} = \frac{1}{2} U_{A\,вх}.$$

Следовательно, входное сопротивление антенны

$$R_{A\,вх} = \frac{U_{A\,вх}}{I_{A\,вх}} = \frac{1}{4}\frac{U_{ф}}{I_{ф}}$$

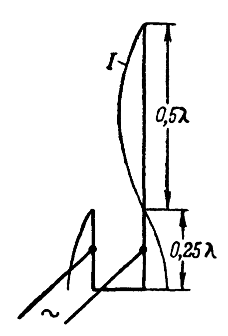
с U-образным трансформатором оказывается в 4 раза меньшим, чем без него. Поэтому, используя U-колено, нельзя питать полуволновый диполь 75-омным кабелем. Применяя такой кабель, следует употреблять в качестве излучателя петлевой шлейф-вибратор, имеющий сопротивление излучения, примерно в 4 раза большее. Если все же желательно использовать при данном симметрирующем устройстве полуволновый диполь, то нужно между ними ставить согласующий четвертьволновый трансформатор, увеличивающий входное сопротивление антенны в 4 раза (фиг. 120,*б*).

Заслуживает внимания и другая система симметрирующего трансформатора, изображенная на фиг. 120,*в*. В этой

системе точка *А* соединяется с внешней оплеткой кабеля, а противофазный потенциал в ней по отношению к точке *Б* фиксируется соединительным U-коленом длиной в полволны. В связи с тем, что входное сопротивление такого U-колена (как четвертьволновый короткозамкнутой линии) близко к бесконечности, ток и напряжение в фидере равны току и напряжению на входе антенны. Следовательно, такой симметрирующий трансформатор не изменяет входного сопротивления антенны.

Антенна с «верхним светом». На ультракоротких волнах очень часто применяется полуволновый вибратор, питающийся с конца от высокоомного фидера. Согласование производится с помощью четвертьволнового резонансного трансформатора (фиг. 121).

Эту антенну можно рассматривать как волновой вибратор, нижняя половина которого согнута в неизлучающую четвертьволновую линию, играющую роль согласующего и симметрирующего трансформатора. Поскольку вся система резонансна, ее входное сопротивление имеет чисто активный характер. Изменяя место присоединения питающего фидера, нетрудно добиться согласования его с антенной.



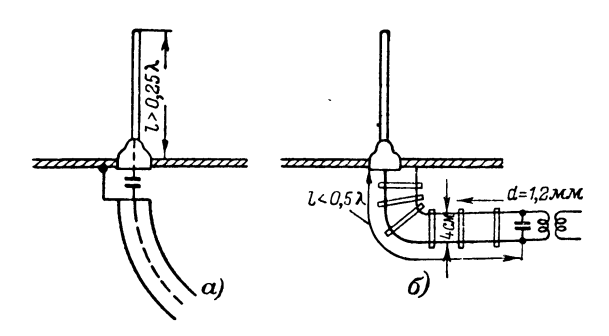
Фиг. 121. Антенна Бонч-Бруевича „с верхним светом".

Такая антенная система обладает одним существенным достоинством. Нижняя точка (место сгиба) находится под нулевым потенциалом высокой частоты, поэтому ее можно заземлять, не изменяя режима работы излучателя. Это и используется на практике при креплении антенны к мачте.

Несимметричный вибратор. Несимметричный вибратор применяется на ультракоротких волнах довольно редко, — в основном в тех случаях, когда излучатель должен быть установлен над металлической поверхностью, например на крыше автомобиля. Тогда бывает удобно питать его низкоомным коаксиальным кабелем (фиг. 122,*а*). Средний провод кабеля соединяется через проходной изолятор с вибратором, а внешняя оплетка с металлической поверхностью. Благодаря тому, что входное сопротивление четвертьволнового вибратора близко к 40 *ом*, а коаксиальный кабель имеет волновое сопротивление порядка 50—120 *ом*, для точного согласования несколько увеличивают длину вибратора сверх 0,25 λ, за счет чего возрастает активная часть его входного сопротив-

ления. Появляющуюся при этом реактивную часть входного сопротивления индуктивного характера нейтрализуют введением последовательного конденсатора. Конденсатор должен иметь максимальную емкость порядка 50 *пф*.

Поскольку измерение коэффициента бегущей волны в коаксиальном фидере неосуществимо, то о согласовании судят по минимальному расстраивающему влиянию цепи антенны на контур усилителя и по величине его нагрузки. Настройку приходится производить в несколько приемов при различных длинах вибратора.



Фиг. 122. Питание несимметричного вибратора, укрепленного на металлическом листе.
а — питание коаксиальным кабелем; *б* — питание двухпроводным фидером.

Если расстояние от передатчика до антенны не превышает полволны, то можно осуществлять питание несогласованным фидером, работающим в режиме стоячих волн. В этом случае при использовании четвертьволнового или полуволнового несимметричного вибратора допустимо питание несогласованным высокоомным фидером по схеме, приведенной на фиг. 122,*б*. Длина фидера должна быть близка к 0,5 λ.

Наивыгоднейшим расположением вибратора является середина металлического листа, но допускается установка и у края. При монтаже необходимо следить, чтобы металлические предметы не загораживали излучателя.

Шлейф-вибраторы. Наибольшее распространение на ультракоротких волнах получили двойной и тройной шлейф-вибраторы. Последний удобен для согласования с 600-омным фидером.

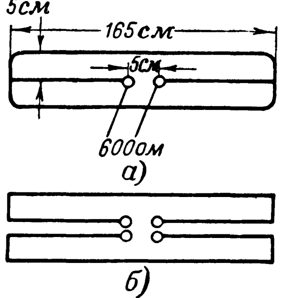
Полная длина двойного вибратора рассчитывается по формуле

$$l = \frac{292}{f},$$

где l — длина, *м*;

f — частота, *мггц*.

Тройной шлейф-вибратор образуется дополнением двойного, рассчитанного по этой формуле, еще одним проводом (фиг. 123,*а*) или как бы сложением двух двойных (фиг. 123,*б*).



Фиг. 123. Тройной шлейф-вибратор для диапазона 85 ÷ 87 *мггц*.

35. Направленные ультракоротковолновые антенны

Антенны с пассивными вибраторами. На ультракоротких волнах нетрудно получить высокую направленность с помощью длинных гармониковых антенн. Конструктивно вполне осуществимы антенны в 10 и более длин волн. Однако вследствие того, что многовибраторные антенны на ультракоротких волнах можно легко сделать вращающимися, использование неподвижных гармониковых антенн теряет свой смысл и применяются они весьма редко.

Многовибраторные антенны, как правило, применяются совместно с пассивными рефлекторами, расположенными друг от друга на расстоянии 0,25 λ. Длина пассивного рефлектора рассчитывается по формуле

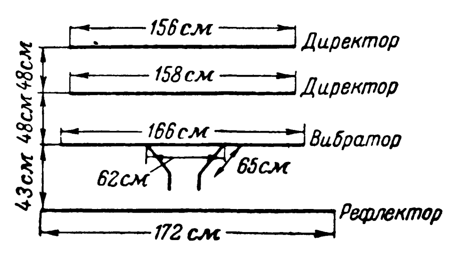
$$l_p = \frac{150}{f}.$$

Следует заметить, что на ультракоротких волнах пассивный вибратор может быть заменен металлическим экраном или сеткой.

Широкое распространение получила антенна с рефлектором и директором. В такой трехвибраторной системе рефлектор должен быть приблизительно на 5% длиннее активного излучателя, а директор — на 4% короче. Активный излучатель может быть выполнен в виде двойного или тройного шлейф-вибратора (при питании от высокоомного фидера).

Часто применяют антенны, состоящие из большого числа пассивных вибраторов. При этом для уменьшения размеров всего устройства и получения эффективного действия наиболее удаленных пассивных элементов сокращают расстояния между вибраторами.

Для согласования таких антенн с фидером чаще всего применяются трансформаторы в виде расходящейся линии или используются шлейф-вибраторы.



Фиг. 124. Четырехвибраторная направленная антенна для диапазона 86 *мггц*.

На фиг. 124 приведены данные четырехвибраторной антенны. Здесь длина антенны $L_A = 0{,}475\lambda$; длина рефлектора $L_p = 0{,}494\lambda$; длина первого директора $L_{\partial 1} = 0{,}455\lambda$; длина второго директора $L_{\partial 2} = 0{,}447\lambda$; расстояние до рефлектора $D_p = 0{,}123\lambda$; расстояние до первого директора $D_{\partial 1} = 0{,}136\lambda$; расстояние до второго директора $D_{\partial 2} = 0{,}272\lambda$.

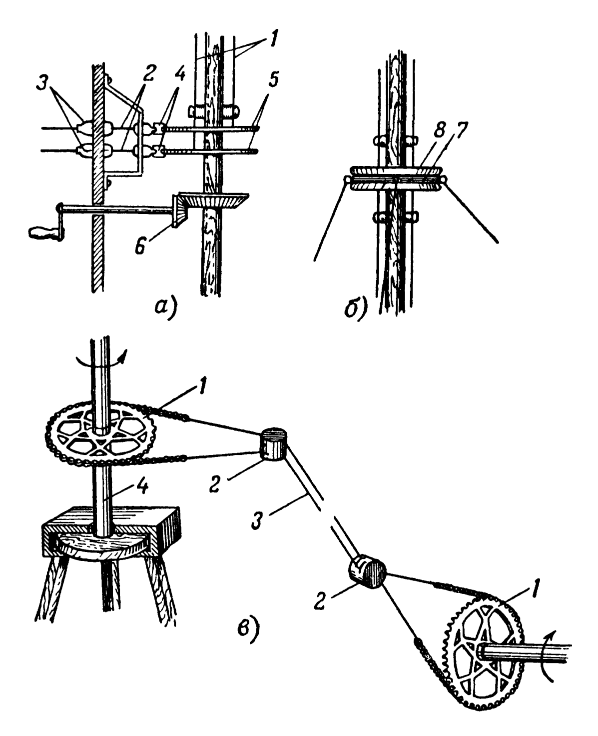
Кроме рассмотренных выше антенн, на ультракоротких волнах могут применяться все направленные антенные системы, используемые в диапазоне коротких волн.

Элементы конструкции вращающихся антенн. На фиг. 125,*а* изображена нижняя часть вращающейся антенны. Питание производится с помощью двухпроводного воздушного фидера *1*. Линия *2* от генератора через проходные изоляторы *3* в стене подводится к двум изолированным роликам *4*, прижимаемым пружинами к медным кольцам *5* на мачте. С колец ток подается на провода линии, идущей вдоль мачты. Мачта своим основанием посажена на опорный подшипник и поворачивается с помощью обычной зубчатой передачи *6*. Верхнее крепление мачты производится в одном-двух местах с помощью тросов, закрепляемых на кольце *7* (фиг. 125,*б*), надетом на горизонтальный ролик *8*. Кольцо должно иметь ушки для закрепления тросов и свободно скользить по ролику.

Вращение антенны можно осуществить и любыми другими способами, например, посредством цепной, ременной или какой-либо другой передачи (фиг. 125,*в*). Конструктивное решение этой задачи определяется местными условиями.

Антенна с уголковым отражателем. Если расположить отражатели не только сзади, но и с боков от антенны, то

излучение будет концентрироваться внутри меньшей части пространства и направленность системы возрастет. Это и сделано в антенне с уголковым отражателем, изображенной на фиг. 126.



Фиг. 125. Элементы конструкции вращающихся антенн.

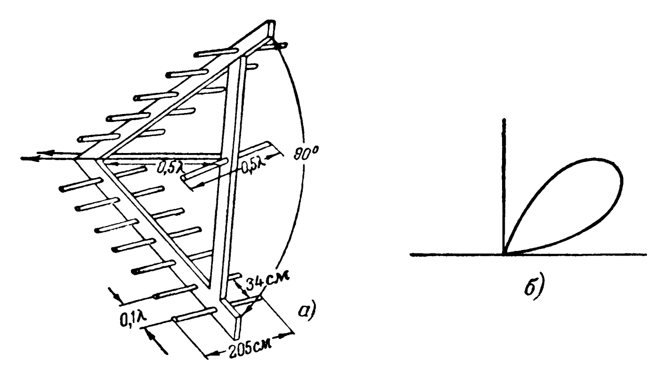
а — нижняя часть вращающейся антенны (*1* — фидер; *2* — выводы фидера передатчика; *3* — проходной изолятор; *4* — роликовый контакт; *5* — контактные кольца; *6* — механизм вращения); *б* — крепление вращающейся мачты (*7* — крепящее кольцо; *8* — обойма для кольца); *в* — антенна с вращающейся вершиной (*1* — шестерня и цепь от велосипеда; *2* — блок; *3* — трос; *4* — вращающаяся вершина мачты).

Конструктивно такая антенна представляет собой легкую деревянную раму, на боковых сторонах которой укрепляется несколько пассивных отражателей.

Питание активного вибратора осуществляется двухпроводной линией, проходящей через вершину угла так, чтобы не нарушать симметрии всей системы. Активный вибратор может быть выполнен в виде обычного полуволнового вибратора или в виде двойного шлейф-вибратора. В последнем

случае достигается непосредственное согласование с 400-омным фидером.

Характеристика излучения антенны имеет один главный максимум и практически лишена боковых лепестков. Она обладает выигрышем в 10 *дб*, по сравнению с полуволновым диполем. Ослабление излучения назад составляет 30 *дб*. Однако следует заметить, что этот выигрыш получается только в плоскости антенны.



Фиг. 126. Антенна с уголковым отражателем.
а — конструкция; *б* — диаграмма направленности.

В горизонтальной плоскости характеристика излучения такой антенны мало отличается от характеристики излучения полуволнового вибратора.

ГЛАВА ШЕСТАЯ
СВЯЗЬ ГЕНЕРАТОРА С АНТЕННОЙ

36. Схемы связи при питании антенны бегущей волной

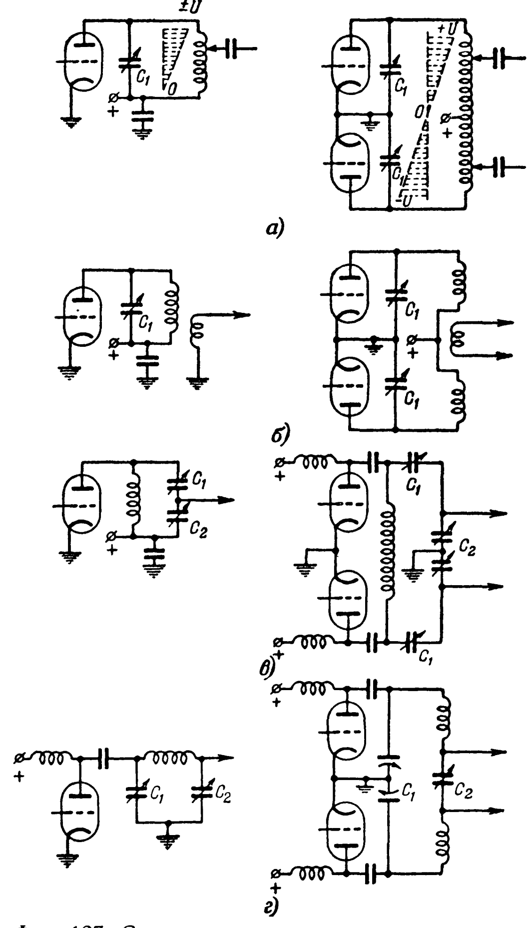
Антенно-фидерное устройство является нагрузкой выходного каскада передатчика.

Выбор того или иного способа связи генератора с антенной определяется в основном типом применяемой антенны, видом фидерной системы, режимом ее работы и схемой выходного каскада передатчика.

Наиболее простой вид схемы связи приобретают в том случае, когда фидер работает в режиме бегущей волны. При этом входное сопротивление антенно-фидерного устройства имеет чисто активный характер и нет надобности в специальном элементе настройки антенной цепи. Нужно

обеспечить только возможность изменения связи анодного контура с цепью антенны.

Как правило, схемы связи строятся так, чтобы питание несимметричного фидера или антенны осуществлялось от несимметричного генератора, а симметричная антенная си-



Фиг. 127. Схемы связи несимметричных антенн с однотактными генераторами и симметричных антенн с двухтактными генераторами при работе фидера в режиме бегущей волны.

стема питалась симметричным генератором, работающим по двухтактной схеме. При отступлении от этого правила мо-

жет произойти серьезное нарушение режима работы антенны или генератора.

На фиг. 127,*а*, *б* и *в* приведены простейшие схемы с автотрансформаторной, индуктивной и емкостной связью несимметричных и симметричных систем. Настройка во всех схемах производится конденсатором C_1. Величина связи регулируется изменением положения щупа на контурной катушке, изменением положения катушки связи или изменением величины емкости конденсатора C_2. Для уменьшения связи через паразитные емкости в схемах фиг. 127,*а* и *б* катушка связи располагается вблизи заземленного конца контурной катушки или же контурная катушка раздваивается в середине и в промежуток помещается катушка связи. В этих участках контурной катушки потенциал высокой частоты (пунктирная линия на фиг. 127,*а*) близок к нулю. В схемах фиг. 127,*г* питание антенны осуществляется через П-образный фильтр, дающий наилучшую фильтрацию высших гармоник.

При регулировке схемы сначала закорачивают конденсатор C_2 и добиваются резонанса с помощью конденсатора C_1. Затем включают конденсатор C_2 и снова устанавливают резонанс, изменяя емкость C_1. Регулировку связи начинают с больших значений C_2. В каждом положении конденсатора C_2 добиваются настройки с помощью C_1 по максимуму тока в контуре или минимуму постоянной составляющей анодного тока. Регулировку продолжают до получения максимального тока в фидере. Величина C_2 обычно берется порядка 1—1,5 *пф* на 1 *м* длины волны.

37. Схемы связи при питании антенны фидером со стоячими волнами

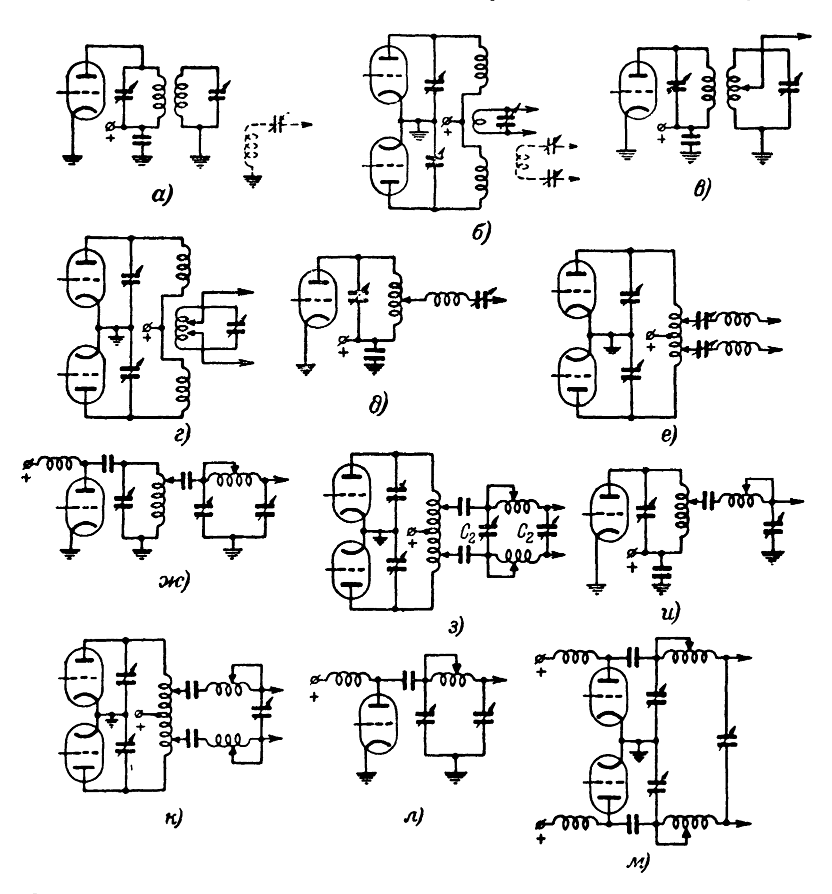
В том случае, когда фидер работает в режиме стоячих волн, его входное сопротивление может иметь реактивную составляющую, для компенсации которой цепь связи должна иметь специальный элемент настройки. Поэтому разбираемые здесь схемы сложнее схем связи с антенной при питании ее бегущей волной.

На фиг. 128 приведены различные схемы, применяемые в рассматриваемом случае.

Схема фиг. 128,*а* применяется для питания несимметричных антенн типа «заземленный вибратор». Настройка может быть осуществлена по параллельной или последовательной схеме (пунктир на фиг. 128,*а*).

По схеме фиг. 128,*б* обычно осуществляется связь антенн, питающихся с помощью симметричного фидера, работающего в режиме стоячих волн. Настройка антенной цепи производится конденсатором переменной емкости, а связь регулируется изменением положения катушки связи.

Часто бывает более удобным катушку связи оставлять неподвижной, а изменять величину связи, включая ту или



Фиг. 128. Схемы связи антенно-фидерных систем, работающих в режиме стоячих волн, с генераторами.

иную часть катушки в антенный контур с помощью гибких перемычек со щупами (фиг. 128,*в* и *г*). Обычно для связи в диапазоне 28 *мггц* бывает достаточно 2—3 витков, а для

диапазона 1,7 *мггц* 25—30 витков. Катушка может быть того же типа, что и в контуре выходного каскада.

Величина емкости переменных конденсаторов должна быть порядка 250—350 *пф* для длинноволновых диапазонов и порядка 100 *пф* — для диапазонов 14 и 28 *мггц* при последовательной настройке. При параллельной настройке антенный контур может быть полностью идентичен контуру оконечного усилителя.

В некоторых случаях длина фидера оказывается такой, что ни при последовательной, ни при параллельной настройке генератор в должной степени не нагружается. Тогда следует несколько изменить длину линии (не больше чем на 0,125 λ) или включить в фидер последовательно небольшие катушки индуктивности (фиг. 128,*д* и *е*), или же применить схемы, приведенные на фиг. 128,*ж* и *з*, которые обычно хорошо работают в большинстве практически встречающихся случаев. Но прежде всего при недостаточной нагрузке генератора следует тем или иным способом пытаться подобрать нагрузку изменением связи антенной цепи с контуром.

Схемы фиг. 128,*в* и *г* применяются для питания симметричных и несимметричных фидеров со стоячими волнами. Положение катушки связи остается здесь неизменным и связь регулируется автотрансформаторным способом. Изменение связи практически не влияет на настройку контуров. При регулировке связи следует обратить внимание, не греется ли какая-нибудь часть катушки связи. Это особенно часто наблюдается в центральной части при близком расположении щупов друг к другу. Нагрев катушки свидетельствует о низком к. п. д. антенной цепи; тогда необходимо изменить положение катушки или перейти к другой схеме связи.

Схемы фиг. 128,*д* и *е* применяются в аналогичных случаях. Они удобны тогда, когда на конце фидера имеет место пучность напряжения.

В схемах фиг. 128,*ж* и *з* связь с антенной осуществляется через П-образный фильтр. Эта схема может применяться практически при любой длине фидера и согласует цепи с самым разнообразным сочетанием полных сопротивлений. При тщательно выполненной настройке схема обладает хорошей фильтрацией гармоник. Схема применяется только при емкостной связи. Применение П-образного фильтра с индуктивной связью сильно усложняет настройку всей системы.

Схемы фиг. 128,*и* и *к* проще схем фиг. 128,*ж* и *з*, но они дают худшую фильтрацию.

В схемах фиг. 128,*л* и *м* П-образный фильтр является нагрузкой оконечного усилителя. Это упрощает всю схему связи с антенной, но фильтрация гармоник также получается не столь высокой, как в схемах фиг. 128,*ж* и *з*.

38. Симметрирующие схемы

В тех случаях, когда приходится симметричную антенну питать от несимметричного генератора или наоборот, следует использовать одну из дополнительных симметрирующих линий связи, устанавливаемых между анодным и антенным контурами. Дополнительные потери и усложнение настройки, которые получаются при этом, невелики. На фиг. 129 приведены примеры таких цепей связи.

В качестве дополнительной линии используется обычно свитый шнур или перекрещивающийся высокоомный воздушный фидер.

Связь с контуром генератора выбирается чаще всего индуктивная, а с антенным контуром — автотрансформаторная; однако можно сделать и наоборот или в обоих случаях применить индуктивную связь.

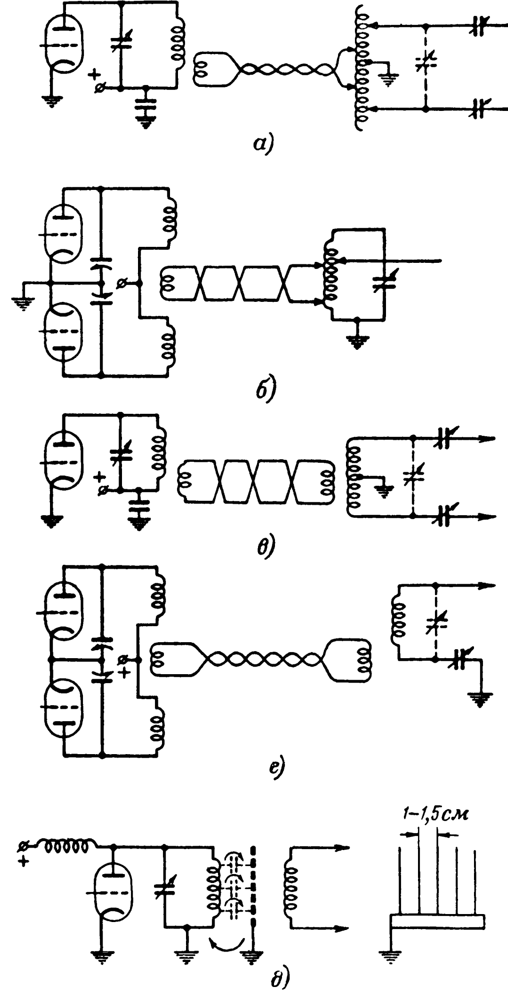
На фиг. 129,*а* и *в* приведены схемы, позволяющие связывать несимметричный генератор с симметричной антенной. Катушка связи, обычно состоящая из нескольких витков провода, располагается около «земляного» конца контура для уменьшения связи через паразитные емкости. В этих схемах очень удобно использовать вариометры.

Практика показывает, что при подобном построении схемы связи излучение высших гармоник практически отсутствует. Некоторую несимметрию на выходе промежуточной линии можно компенсировать соответствующим расположением щупов на катушке контура антенны. Настройка может осуществляться как по последовательной, так и по параллельной схеме (пунктир на фиг. 129,*а* и *в*).

Схемы, приведенные на фиг. 129,*б* и *г*, предназначены для связи симметричного генератора с несимметричной антенной.

Все приведенные на фиг. 129 схемы могут быть использованы для питания антенны как бегущей, так и стоячей волной. В силу своей гибкости, отсутствия излучения гармоник и способности связывать между собой любые схемы подобные цепи связи получили весьма широкое распространение.

Если использование симметрирующих схем почему-либо нежелательно, то следует применить индуктивную связь, установив между контурной катушкой и катушкой связи



Фиг. 129. Симметрирующие схемы.

электростатический экран, представляющий собой систему тонких проводов, натянутых на деревянную рамку (фиг. 129,*д*). С одной стороны все провода изолируются

друг от друга, чтобы в них не возникли вихревые токи, а с другой стороны соединяются вместе и заземляются. Экран исключает связь через паразитные емкости, не нарушая магнитной связи катушек.

Уничтожение паразитной емкостной связи важно еще и потому, что она способствует проникновению в цепь антенны высших гармоник.

39. Эквивалент антенны

При налаживании передатчика далеко не всегда бывает возможно связывать его непосредственно с антенной. Много удобнее нагружать генератор на какую-нибудь простую электрическую цепь, которая по своим электрическим параметрам равноценна реальной антенне. Такую цепь называют *эквивалентом антенны.*

Известно, что входное сопротивление антенны имеет как активную, так и реактивную составляющие, которые изменяются с частотой. Поэтому и эквивалент антенны должен содержать активное и реактивное сопротивления, величину которых можно было бы изменять в нужных пределах.

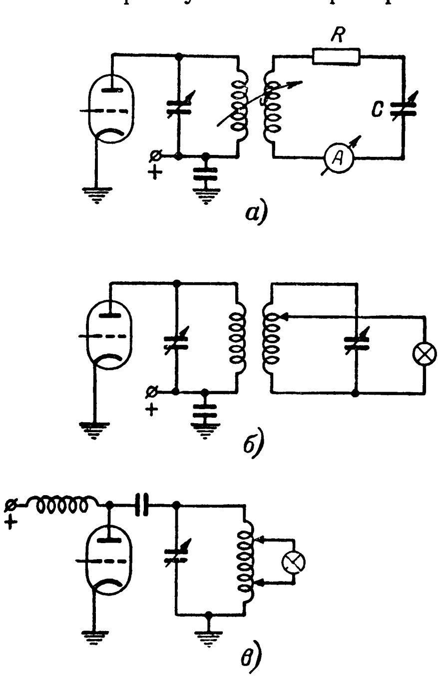
Эквивалент антенны может быть использован двояко. Если передатчик уже налажен, то при испытании его в диапазоне частот или при регулировке цепи связи с антенной он может нагружаться на эквивалент антенны. Сопротивление его на каждой испытуемой частоте должно равняться входному сопротивлению антенны, с которой передатчик должен работать в реальных условиях.

Эквивалент антенны представляет собой несложную цепь из сосредоточенных постоянных, поэтому с его помощью легко замерить токи, напряжения и мощность, отдаваемые передатчиком антенне, и подобрать необходимые элементы настройки. В этом случае генератор на каждой заданной волне будет отдавать такую же мощность, что и при работе с реальной антенной.

Проведение данного испытания осложняется тем, что необходимо предварительно знать закон изменения входного сопротивления антенны по диапазону. Поэтому часто (особенно в любительских условиях) при налаживании передатчика производят более простые испытания — на режим максимальной мощности. Задача тогда состоит в том, чтобы нагрузить передатчик так, чтобы он на любой волне рабочего диапазона отдавал максимально возможную мощность. Знание режима максимальной мощности позволит

судить об эффективности работы цепи связи с антенной и о качестве ее регулировки при работе с реальной антенной.

В этом случае эквивалент антенны должен быть способен, во-первых, настраиваться на любую заданную волну, чтобы представлять собой чисто активную нагрузку для генератора; во-вторых, он должен быть способен рассеивать всю отбираемую от генератора мощность; в-третьих, связь эквивалента с генератором должна быть переменной для подбора наивыгоднейшей величины нагрузки на генератор.



Фиг. 130. Эквивалентные антенны.

На фиг. 130,*а* изображен эквивалент антенны, состоящий из последовательно соединенной емкости *C*, активного сопротивления *R* и катушки связи *L*. Поглощаемая мощность рассеивается в сопротивлении *R*. Конденсатор *C* служит для получения резонанса в цепи эквивалента. Ток в эквиваленте измеряется амперметром *A*. Зная сопротивление *R* и ток в цепи, легко подсчитать мощность, отдаваемую генератором в цепь антенны. Прибор можно проградуировать непосредственно в ваттах. Регулировка величины нагрузки на генератор прозводится изменением связи генератора с эквивалентом.

Для измерения мощности генераторов до 100 *вт* целесообразно пользоваться тепловым прибором на 2 *а*. При этом поглотительное сопротивление должно быть порядка 25 *ом*.

В том случае, когда отсутствует подходящий прибор, он может быть заменен обычной лампой накаливания на напряжение 127 или 220 *в*. Мощность ее подбирается в соответствии с ожидаемой мощностью генератора (фиг. 130,*б*).

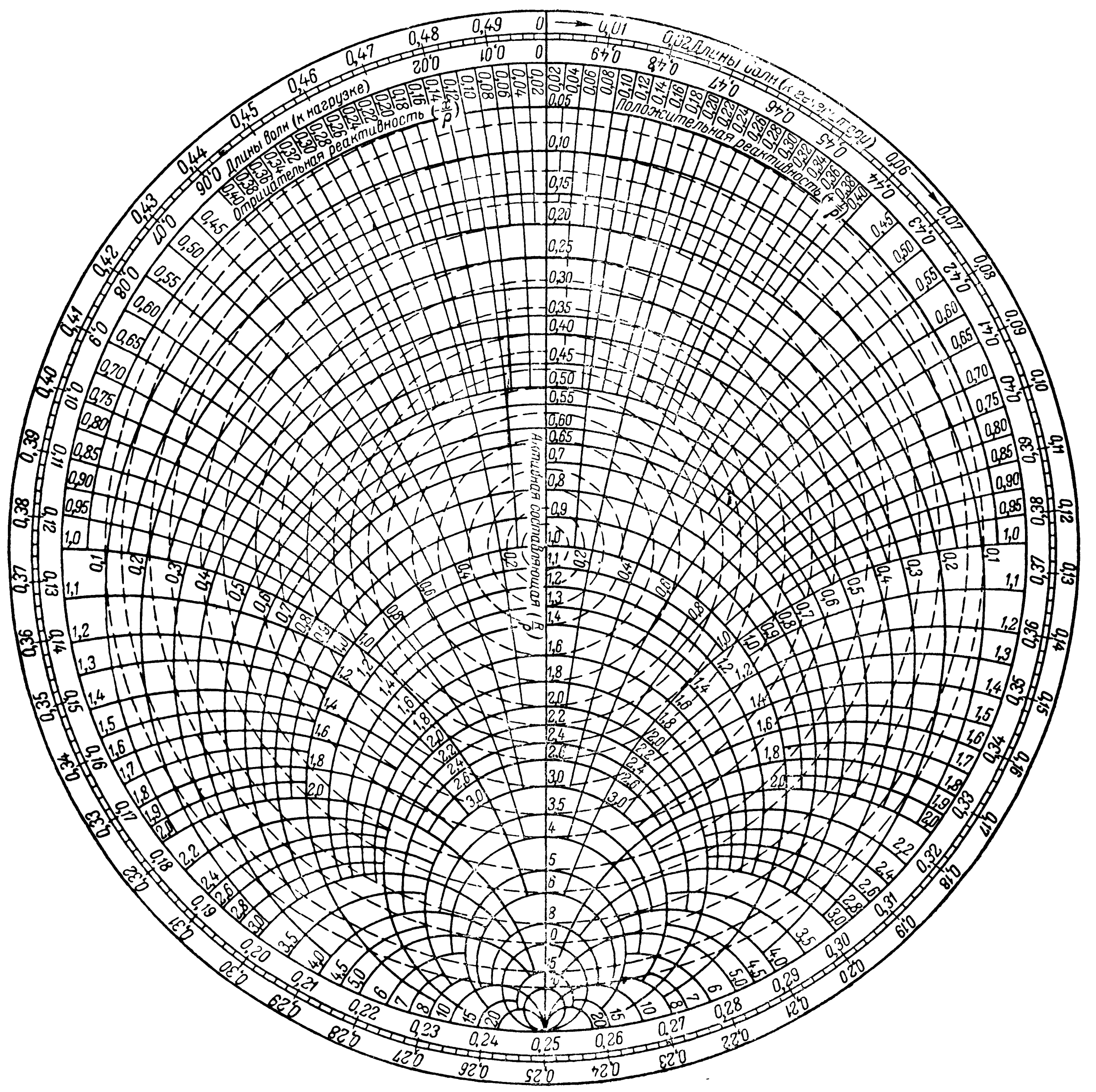
Сравнивая свечение ламп эквивалента со свечением такой же лампы, включенной в осветительную сеть, можно грубо определить величину генерируемой мощности. Более точно это сравнение может быть произведено с помощью обычного фотографического фотометра.

Измерения с лампой можно производить на частотах не свыше 60 *мггц*. При сильных изменениях мощности по диапазону нужно иметь набор «ламп сравнения» различной мощности или использовать мощную лампу с включенным в ее цепь реостатом. Потребляемая ею мощность измеряется с помощью вольтметра и амперметра.

На частотах свыше 60 *мггц* в качестве поглотительного сопротивления нужно использовать высокоомные безиндукционные угольные сопротивления.

Наконец, в самом простом случае вообще не производят измерения генерируемой мощности. Для установления оптимального режима работы генератора используют лампу накаливания, к цоколю которой припаиваются два щупа (фиг. 130,*в*). Ее присоединяют непосредственно к части контурной катушки и настраивают контур в резонанс. Изменяя число витков, к которым присоединяется лампа, подбирают оптимальный режим по максимальному свечению лампы. Фиксируют величину минимума постоянной составляющей анодного тока лампы, что и будет являться основным ориентиром во время настройки выходного каскада при работе с реальной антенной.

Все эти операции во избежание поражения оператора высоким напряжением можно производить только при параллельной схеме питания анода лампы.



Фиг. 16. Номограмма Вольперта для рассмотрения процессов в длинных линиях, замкнутых на произвольную нагрузку.

К ЧИТАТЕЛЯМ

Выпуски массовой радиобиблиотеки служат важному делу пропаганды радиотехнических знаний среди широких слоев населения нашей страны и способствуют развитию радиолюбительства В свете этих задач большое значение имеет привлечение радиолюбительской общественности к критике каждой вышедшей книги и брошюры

Редакция массовой радиобиблиотеки обращается к читателям данной книги с просьбой прислать свои отзывы, пожелания и замечания вместе с краткими сообщениями о своем образовании, профессии, возрасте и радиолюбительском опыте по адресу: Москва, Шлюзовая набережная, д. 10. Редакция массовой радиобиблиотеки Госэнергоиздата.

Цена 4 р. 40 к.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

под общей редакцией академика А. И. БЕРГА

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ И ПОСТУПИЛИ В ПРОДАЖУ

КУШЕЛЕВ Ю. Н., Магнитофон-приставка, стр. 16, ц. 35 к.

МАЛИНИН Р. М., Усилители низкой частоты, стр. 152, ц. 3 р. 45 к.

ДОЛЬНИК А. Г., Громкоговорители, стр. 48, ц. 1 р. 15 к.

ЖЕРЕБЦОВ И. П., Введение в радиотехнику дециметровых и сантиметровых волн, стр. 192, ц. 4 р 30 к.

ДОЛЬНИК А. Г. и ЭФРУССИ М. М., Автоматический регулятор напряжения, стр. 16, ц. 40 к.

Радиолюбительские конструкции (Указатель описаний), стр. 120, ц. 4 р.

ПУМПЕР Е Я., Кристаллические диоды и триоды, стр. 176, ц. 4 р.

ЧЕЧИК П. О., Радиотехника и электроника в астрономии, стр. 104, ц. 2 р. 40 к.

КЕРНОЖИЦКИЙ Е. П., Настольная радиола с магнитофоном, стр. 24, ц. 60 к.

ЭФРУССИ М. М., Слуховые аппараты, стр. 48, ц. 1 р. 20 к.

ПРОДАЖА ВО ВСЕХ КНИЖНЫХ МАГАЗИНАХ И КИОСКАХ

ИЗДАТЕЛЬСТВО ЗАКАЗОВ НЕ ВЫПОЛНЯЕТ